

MANUAL TÉCNICO PARA EL APROVECHAMIENTO Y ELABORACIÓN DE BIOMASA FORESTAL

MANUAL TÉCNICO PARA EL APROVECHAMIENTO Y ELABORACIÓN DE BIOMASA FORESTAL

Autor: Eduardo Tolosana Esteban

ODA A LA ENERGÍA

En el carbón tu planta
de hojas negras
parecía dormida,
luego
.....
fue
una lengua loca
de fuego
y vivió adentro
de la locomotora
o de la nave,
rosa roja escondida,
víscera del acero,
.....
donde alcanzó tu fuego,
llegaron los racimos,
crecieron
las ventanas,
las páginas se unieron como plumas
y volaron las alas de los libros:
nacieron hombres y cayeron árboles,
fecunda fue la tierra.
.....
Fuego que corre y canta,
agua que crea,
crecimiento,
transforma nuestra vida,
saca
pan de las piedras,
oro del cielo,
ciudades
del desierto,
danos,
energía,
lo que guardas,
.....
Entonces, oh energía,
espada ígnea,
no serás
enemiga,
flor y fruto completo
será tu dominada
cabellera,
tu fuego
será paz, estructura,
fecundidad, paloma,
extensión de racimos,
praderas de pan fresco.

MANUAL TÉCNICO PARA EL APROVECHAMIENTO Y ELABORACIÓN DE BIOMASA FORESTAL

Edita: XXXXXXXXXXX XXXXXXXX XX XXXXXXXXXXX XX XXXXXXXXXXX

Diseño: José Luis Blanco Quiñones

Imprime: ICONO Imagen Gráfica, S.A.

Primera edición: Septiembre 2009

ISBN: 000-00-000-0000-0

Depósito Legal: M-00000-2009

EQUIPO REDACTOR

Las siguientes personas, miembros del equipo especializado en Aprovechamientos Forestales del Departamento de Economía y Gestión Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid, han participado como colaboradores y miembros del equipo de redacción en los capítulos correspondientes a las experiencias concretas de extracción y procesado de biomasa:

Rubén Laina Relañó	Ingeniero de Montes (Colaborador, redactor de los Apartados 7, 9 y 10)
Rocío Martínez Ferrari	Ingeniera de Montes (Colaboradora, redactora de los Apartados 6 y 8)
Marina Martín Serrano	Ingeniera Técnica Forestal (Colaboradora, redactora del Apartado 10)
Yolanda Ambrosio Torrijos	Dra. Ingeniera de Montes (Colaboradora, supervisora general, responsable de proceso de datos)

ÍNDICE

Prólogo	15
Introducción	23
1.– Fundamentos de los sistemas de aprovechamiento de biomasa forestal primaria	25
2.– La maquinaria empleada para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal	35
3.– Impactos negativos potenciales de la extracción de biomasa forestal	65
4.– Prácticas recomendables por razones de seguridad y salud	77
5.– El aprovechamiento integral de biomasa en los resalveos de montes bajos de Rebollo	85
6.– El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa	117
7.– El aprovechamiento integral de biomasa en claras sobre repoblaciones de <i>Pinus sylvestris</i> L. y <i>Pinus pinaster</i> Ait	171
8.– El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos	205
9.– El aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas a hecho de pinares de pino silvestre y resinero	239
10.– Otras experiencias de aprovechamiento de biomasa forestal en tratamientos selvícolas sobre pinares y en podas de encinares	279
11.– Situación de aprovechamiento de biomasa forestal en tres países cercanos con distintas políticas de fomento: Portugal, Francia e Italia. Conclusiones sobre políticas de incentivación a las energías renovables de origen forestal ..	311
12.– Bibliografía	341

PRÓLOGO

I

El Diccionario Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (S.E.C.F., 2005) define biomasa, dentro del campo temático de la Ecología, como “Conjunto de sustancias orgánicas de los seres vivos existentes en un determinado lugar”, y biomasa primaria como “materia orgánica correspondiente a la energía fijada a partir de la fotosíntesis de los vegetales”, mientras que la biomasa residual sería “biomasa resultante de algún tipo de actividad humana”. La Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 define biomasa como “Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

Debido a los actuales incrementos de precios de las fuentes de energía no renovables tradicionales, especialmente de los combustibles fósiles, en esta segunda mitad de la primera década del siglo XXI, como ocurrió en la llamada “crisis del petróleo” de los años setenta del pasado siglo XX, se habla mucho de la biomasa forestal, como de otros recursos renovables, por su potencial uso energético. En este contexto, biomasa se puede también definir como “Materia orgánica en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente directa o indirecta de energía” (Vocabulario Científico y Técnico. Real Academia de Ciencias, Exactas, Física y Naturales. Madrid, Espasa Calpe, 1990), dentro de la cual la biomasa forestal primaria sería la producida directamente como consecuencia de procesos fotosintéticos, por los vegetales, generalmente leñosos, que forman las masas forestales.

La utilización de términos novedosos puede ser un ejercicio de esnobismo impropio, como señala atinadamente Sierra Vigil (2008), y enmascarar el hecho de que el uso energético de la biomasa de origen forestal no es algo nuevo, ni siquiera algo que se recupere en la actualidad de un pasado remoto, como podría parecer a los pobladores urbanos del primer mundo.

Con respecto a la historia del uso de la biomasa forestal para producir energía térmica –o, como tal vez sea más lógico redactar, “de la leña para calentarse o cocinar”– los antecedentes pueden ser más antiguos que nuestra propia especie. De hecho, de acuerdo con Goren-Inbar *et al.* (2004), los restos de fogatas en el yacimiento israelí de Gesher Benot Ya’aqov datan de hace 790.000 años y probablemente pertenecieran a una forma arcaica

de *Homo sapiens*, de *Homo erectus* o de *Homo ergaster*. En la misma Península Ibérica, en el famoso yacimiento burgalés de Atapuerca, las excavaciones de 2007 en la llamada Covacha de los Zarpazos han rendido un negativo de un fragmento grande de raíz y un fragmento de carbón de pino (Carbonell, 2007), lo que sugiere que el *Homo antecesor* podría haber conocido el uso del fuego hace unos 300.000 años, aunque los hogares más antiguos que se han determinado con seguridad son de hace *sólo* 150.000 años, correspondientes a *Homo heidelbergensis*. De hecho, el estudio de los carbones de los hogares prehistóricos constituye la antracología, una disciplina auxiliar para el estudio de la vegetación y la explotación humana de los recursos en épocas prehistóricas (por ejemplo, *vid.* Allué, E. *et al.*, 2007).

Si nos referimos a la importancia actual del uso de la biomasa con fines energéticos, cabe señalar que la biomasa de origen vegetal constituye el cuarto recurso explotado a escala mundial, suponiendo un 14% del consumo energético del planeta. Sin embargo, salvo en Austria, Finlandia y Suecia, donde ocupa un lugar de cierta importancia, en el balance general de Europa, la biomasa sólo supone un 2%, de acuerdo con las Comunidades Europeas (CE, 1995-2008).

En los países en desarrollo, este uso se ha incrementado en los últimos años, pasando de 736.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep) en 1990 a 879.000 en 2003 (WRI, 2005), y de hecho el aprovechamiento desordenado de leñas está considerado una amenaza para los recursos forestales, suponiendo hoy la mayor parte de las extracciones en los países del llamado Tercer Mundo –de hecho, en África subsahariana, la leña supuso el 88,5% de la producción forestal en el periodo 2000-2002 (WRI, 2005, a partir de datos de FAO y el Banco Mundial)–.

La razón para que en la desarrollada Unión Europea no se aproveche en un grado significativo este recurso radica en ciertos problemas logísticos y tecnológicos en relación con los sistemas de producción colectiva de energía –dificultad y elevado coste de recolección, transformación, transporte y almacenamiento, compleja combinación de los combustibles de origen vegetal con otros fósiles, etc.–, que han hecho que, tradicionalmente, sus costes no hayan resultado competitivos con respecto a los combustibles fósiles u otras fuentes no renovables. Un testimonio de estas dificultades se encuentra en el hecho de que, incluso en los Países Nórdicos, el desarrollo del sector de la llamada bioenergía habría sido imposible sin una decidida política de apoyo público que ha posibilitado su liderazgo tecnológico en sectores primarios y secundarios.

No obstante, el actual panorama de costes de los derivados del petróleo, que se han multiplicado en escasos meses, junto con los problemas debidos a la producción de dióxido de carbono, principal gas responsable del “cambio climático”, han llevado a los responsables

políticos europeos a compromisos de potenciación de las energías renovables, y en particular de fomento de la biomasa forestal con fines energéticos. Hay que recordar que estos combustibles, si son obtenidos en el seno de sistemas de gestión sostenible, son neutros al respecto de las emisiones de gases de “efecto invernadero”, dado que la cantidad de CO₂ que se produce por su combustión, ha sido fijada en un periodo muy reciente y vuelve a ser fijada siempre que se mantengan los usos del territorio que han dado lugar a la obtención de ese combustible –es decir, los montes o cultivos de que provenga la biomasa–. En cuanto al debate sobre la energía precisa para la obtención de ese combustible, que fuentes poco dignas de crédito han llegado a asegurar que supera con creces la energía que produce su aprovechamiento, ha sido cuantificada en un 3% de su potencial (Hakkila, 2004; Björheden, 2009).

Precisamente esta posible utilidad energética ha originado el hecho de que los residuos de la industria forestal, que constituyen la llamada biomasa forestal secundaria, y cuyos costes de obtención y transporte son muy reducidos en comparación con la biomasa forestal primaria, se emplee en la actualidad de forma generalizada en España, como en el conjunto de Europa, obteniéndose en el estado español una producción energética que equivale a un millón y cuarto de toneladas equivalentes de petróleo en las industrias forestales de pasta y papel, maderas, mueble y corcho, lo que totaliza un 29,5% de la producción española de energía a partir de la biomasa en 2005 (IDAE, 2007).

Frente a ello, la utilización de biomasa forestal primaria sólo tiene importancia en el ámbito doméstico que, según las mismas fuentes, consumía en aplicaciones fundamentalmente térmicas en 2005 aproximadamente 2 millones de t.e.p., casi un 48% de la producción energética nacional total a partir de todos los tipos de biomasa. La escasa utilización de esta biomasa forestal primaria en la producción energética no doméstica, que podríamos llamar “industrial” o “colectiva”, deriva de los citados problemas de logística y de costes de la obtención y suministro a que ya se ha hecho referencia, y cuyo análisis es uno de los objetivos del presente texto.

Cabe hacer alguna consideración sobre la contribución potencial de los recursos forestales a la solución de los problemas energéticos de nuestra sociedad. La primera se debe referir a la importancia potencial de la energía que se puede obtener a partir de esos recursos. Si se piensa en la generación eléctrica, es sabido que la eficiencia es muy baja, de modo que una planta de tamaño medio requerirá entre 9.000 y 10.000 toneladas verdes de biomasa al año por MW instalado. Esto significa que para la producción instalada en una central nuclear de las que siguen activas en España, con potencias eléctricas de entre 900 y 1000 MW instalados por reactor, harían falta entre 8 y 10 millones de toneladas verdes de biomasa al año. Cabe recordar que las cortas anuales de madera y leña en España totalizan entre 14 y 16 millones de metros cúbicos con corteza en los últimos 10 años, y entre 2 y 3 millones de estéreos de leña, lo que podría suponer en total unos 15 millones de toneladas en verde. Es decir, que la biomasa forestal por sí sola no resulta una alternativa global a los combustibles fósiles, sino una alternativa local, en una proporción reducida. Algunos estudios han cuantificado la producción potencial de energía a partir de biomasa

forestal primaria –de carácter residual– en España en 1.370.000 t.e.p./año (Tragsatec-U.P.M., 1999), teniendo en cuenta sólo la fracción aprovechable desde el punto de vista de las limitaciones de infraestructuras y de tipo fisiográfico. Habría que reducir esta posibilidad si se atiende a otras limitaciones debidas a la propiedad o a los tamaños de explotación.

Esto no quiere decir que el aprovechamiento de biomasa primaria de origen forestal no sea interesante, especialmente si no se centra en la sola producción de energía eléctrica sino que se emplea en centrales de cogeneración que aprovechen también la energía térmica para calefacción doméstica, generación de frío o calor colectivo o industrial, etc. Desde luego, hoy por hoy las aplicaciones térmicas de la biomasa forestal presentan mucha ventaja desde el punto de vista de su balance económico con respecto a la producción de energía eléctrica en cuanto a los costes de materia prima, aunque son penalizadas por los elevados costes de las calderas.

Pero lo dicho sí expresa el límite cuantitativo de la biomasa forestal como fuente de energía en comparación con las alternativas fósiles o no renovables. No se debe olvidar que los países que más energía de origen en biomasa forestal producen, especialmente aquellos en que una política de primas ha potenciado el uso en áreas en que el recurso no es tan abundante como en los países nórdicos, se han convertido en grandes importadores de biomasa, incapaces de producir la que necesitan para la producción energética. Es el caso de Italia, pero también son importadores de biomasa de origen ruso o báltico los países escandinavos (SYDVED, 2005; CGC biomasa, 2005).

También es cierto que, aunque la biomasa forestal primaria no vaya a resolver completamente los problemas energéticos, sí puede ser que su uso energético contribuya a resolver ciertos problemas forestales, como por ejemplo la total ausencia de gestión en ciertas masas de frondosas o en repoblaciones jóvenes de coníferas, que contribuye al fenómeno indeseable de los incendios forestales. Desde ese punto de vista, se puede concebir el aprovechamiento de biomasa con fines energéticos como una oportunidad –sin exagerar su justo punto– para la economía de los vapuleados propietarios forestales particulares, o para la muchas veces paupérrima dotación de las Administraciones públicas competentes para el cuidado de los montes.

Otro aspecto que no debe olvidarse es que el sector energético irrumpiría como un demandante más en el mercado de los productos forestales, y que la mejor biomasa, desde varios puntos de vista, es la que se obtiene de la madera. Frente a visiones poco realistas sobre a dónde se va a dirigir esa demanda, de aquellos que piensan que la biomasa va a obtenerse preferentemente de recursos subexplotados o no explotados en absoluto –montes bajos, claros, etc.–, la lógica del mercado señala que los nuevos demandantes competirán con los tradicionales por los recursos más baratos, es decir, por los que ya se están utilizando, in-

cluyendo la madera recuperada de residuos urbanos e industriales, que tiene excelentes condiciones como combustible, al igual que como materia prima para tablero aglomerado. Frente a ello, los recursos inutilizados generalmente son los más caros de obtener, o los que presentan alguna limitación tecnológica.

Es decir que, aunque finalmente la presencia de nuevos demandantes podría hacer que el mercado se ensanchase y alcanzara a ciertos recursos inutilizados, no cabe duda que esto conllevará una subida de los precios de la materia prima para sus consumidores tradicionales, que puede poner en peligro su actividad, conduciendo incluso al cierre de fábricas, como puede ocurrir en Italia, entre otros países europeos (Rodríguez Abella, 2007; Döry, 2007). El papel de las Administraciones públicas en este nuevo (o renovado) sector, además de proveer los incentivos actuales a la producción energética con biomasa, entre otras renovables, debería desarrollarse, a nuestro juicio, en un triple plano:

- Promover nuevas instalaciones, a través de sociedades mixtas, buscando unas localizaciones que eviten conflictos excesivos con los actuales usuarios, como se ha hecho en los países nórdicos o en Portugal, en que la sociedad energética pública EDP promovió y gestionó la pionera planta de generación eléctrica de Mortagua.
- Controlar el proyecto y construcción de nuevas instalaciones, exigiendo un plan de suministro realista que evite los conflictos innecesarios, tal como se plantea en Portugal o está en curso en Galicia.
- Apoyar a los sectores interesados (maderistas, propietarios forestales, industria, sector energético) proporcionándoles información y ayudas para entrar en este nuevo ámbito de actividad. Las experiencias portuguesa, austriaca y escandinava muestran que lo lógico es que haya identidad o estrecha relación entre las compañías suministradoras de biomasa y las de madera u otros productos forestales. El sector de los rematantes forestales o “maderistas” requiere de apoyo público indirecto para su modernización, no sólo tecnológica sino también en gestión empresarial.

IV

Este manual trata de contribuir a proporcionar la información necesaria, de carácter práctico, para mejorar en cuanto a las mencionadas dificultades logísticas, complicación organizativa y costes elevados del suministro de biomasa forestal, aportando referencias basadas en experiencias propias y en datos de experiencias externas. El objetivo primario es analizar los medios y sistemas de trabajo que se emplean en el aprovechamiento de la biomasa forestal primaria con fines energéticos, proporcionando elementos para su optimización.

No se pretende que este texto sea representativo de todas las posibilidades de aprovechamiento de biomasa en el medio forestal español, sí que pueda resultar clarificador y

orientativo en algunos aspectos y para numerosos tipos de intervenciones. Se ha comenzado planteando experiencias en situaciones con visos de posible rentabilidad, no evaluando para comenzar los casos más desfavorables –pendientes elevadas, producción por hectárea muy reducida, etc.–. No obstante, como se desarrolla en el texto, se estima que hay bastante margen de mejora sobre los rendimientos y costes que se proporcionan para las experiencias evaluadas, sea por una mayor integración con operaciones de aprovechamiento de madera, por adquisición de mayor experiencia o por mayor adecuación de los medios y máquinas empleados a las condiciones de los bosques objeto de aprovechamiento.

Los aspectos más prácticos provienen de las experiencias que se han llevado a cabo entre los años 2006 y 2008, sobre todo en Castilla y León, aunque también en Andalucía y Navarra, dentro de una serie de experiencias piloto que han sido financiadas y coordinadas por la Junta de Castilla y León, especialmente a través de la Fundación CESEFOR.

Castilla y León es una Comunidad Autónoma en que diversos factores apuntan al interés del aprovechamiento de sus recursos de biomasa forestal, como la elevada superficie forestal y existencias, el reducido porcentaje de extracciones en comparación con el crecimiento, y la existencia de comarcas con tradición forestal secular.

V

Como autor del presente Manual, quiero transmitir mi agradecimiento a las personas que han colaborado conmigo en la organización y seguimiento de las experiencias, y en la posterior elaboración de los datos. En primer lugar, debo reconocer el excelente trabajo y gran espíritu de equipo de mis compañeros en el diseño y control de las pruebas en que se ha basado este texto, los Ingenieros de Montes Rubén Laina Relaño y Rocío Martínez Ferrari, la Ingeniera Técnica Forestal Marina Martín Serrano y la Doctora Ingeniera de Montes y Profesora de la Universidad Politécnica de Madrid Yolanda Ambrosio Torrijos. Sin la dedicación ardua y las buenas ideas de mis colaboradores, este Manual no habría sido posible. En las siguientes líneas, hablaré también en su nombre.

Muchas personas nos han apoyado o han aportado su trabajo o sus conocimientos para permitir que alcanzásemos los objetivos de divulgación y extensión que se materializan en este texto, en la mayor medida posible, y son por tanto corresponsables parciales de sus posibles aciertos. En primer lugar, nos sentimos en deuda especial con los responsables de la Dirección General del Medio Natural de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, en especial con nuestro amigo Mariano Torre, Director General hasta 2007, que junto con el resto de responsables, técnicos y otro personal, ha impulsado en un grado sin precedentes la gestión forestal en esa Comunidad hasta convertirla en un modelo para el resto del Estado. Gracias por tu claridad y por tu bonhomía. También debemos agradecer su apoyo, su certera visión e incansable iniciativa, a Álvaro Picardo, Asesor de esa Dirección General que ha sido un dinamizador clave y principal impulsor de la biomasa forestal en Castilla y León. Y, por supuesto, a los técnicos que nos han apoyado en los

trabajos de campo, de entre los que, sin pretender ser exhaustivos, citaremos a José Antonio Lucas, Eduardo Grande, Cristina Alcalde, Aurora Cabrejas, M^a Jesús García, Blas Andrés, Alejandro Crespo, M. Henar Fernández, Miguel Reinares, Luis Finat, José María Feliz, Juan Carlos Peral, Agustín Argulo, Pedro Cotillo o Froilán Sevilla.

También debemos nuestro reconocimiento al personal de CESEFOR, de cuya mano hemos llevado a cabo estos estudios y hemos desarrollado estas herramientas de aplicación. Comenzando por su Gerente, José Luis Alonso Sanz, debemos agradecer su colaboración a Antonio Gonzalo, Carmelo Rodríguez, Álvaro Parrado, Paco Rodríguez, Marcos Martín y Olga Moro, entre muchos compañeros de las secciones de Comunicación, Investigación y Desarrollo e Industria. Pero con quienes más experiencias hemos compartido ha sido con los amigos del Departamento Forestal, en el que tenemos que destacar a Juan Carlos Fernández Guerrero, Daniel Pinto y Amaia Cortijo, con quienes tantos montes hemos visitado y tanto hemos debatido sobre el mundo de la biomasa y otros mundos, y con el resto de los técnicos y personal de administración de la sede de CESEFOR en Soria. Dejo para el final de este apartado al que ha sido el principal artífice de estos estudios. Con su profundo conocimiento del medio forestal, su red de contactos, muchos de ellos amigos y convecinos, en la tierra soriana de Pinares, su sentido inapelable de la realidad y su gran profesionalidad, tenemos que agradecer muy especialmente su trabajo y su amistad a Félix Pinillos Herrero.

Por supuesto, no queremos olvidarnos del personal de las empresas de los que tanto hemos aprendido, y de cuya experiencia práctica es fruto buena parte de lo que en este Manual se desarrolla. Personas con notable iniciativa y gran capacidad de trabajo en un medio a veces tan hostil como el forestal, como por ejemplo Ambrosio y Pepe Montero (Triturados Montero), Ezequiel Rubial y Juan Carlos Molinero (Maderas Rubial), Fernando Castañeiras (Maderas Castañeiras), Antonio González Sarriá (Estyant), José Antonio Fernández Carreño (Infoyma), Ana Herrero (Comtradi), Mario Esteves (Logística Florestal), los hermanos Calero (Maderas Calero), José Barrios y Guillermo Herranz (Garnyca Plywood), Ignacio Macicior (Aprovechamientos Ecológicos AECO S.A.), Javier Maisterra, Pablo Millán, Héctor Merino y Gustavo Garrosa (Tragsa) y el personal de Ramafosa, Recolecciones Forestales, Monzón 21, Maderas Anadón y José Cubero, entre otras empresas. También ha sido esencial la colaboración de los maquinistas, de los que nombraremos a José Antonio Pereira (Maderas Rubial), “Chucha” (Recolecciones Forestales) y Rubén (Garnyca), entre otros muchos.

Debemos agradecer también su cooperación a algunos organismos que han prestado su apoyo en la realización de análisis, como el Laboratorio de Combustibles de la Junta de Castilla y León en León (LARECOM), o en la cesión de un aprovechamiento realizado en sus terrenos como campo de experimentación, caso del Centro de Estudios de Energías Renovables (CENER) de Lobia (Soria), dependiente del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas del Ministerio de Ciencia e Innovación).

Numerosos amigos técnicos, profesores o empresarios, han compartido con nosotros experiencias y visiones que han aportado luz sobre la materia de que trata este Manual. Es

difícil, como en los casos anteriores, llegar a una relación exhaustiva, pero debemos citar a Santiago Vignote, Ángel Carrascosa, Domingo Rodríguez Abella, Víctor M. González González de Linares, Juan Picos, Judit Rodríguez Bayo, José María Néstar, Pedro Albizu, Sergio Franco, Óscar Fernández Carro, Miguel Ángel Cogolludo, Roberto Astorga, Antonio Oliveros, Andrés Espejo, Ana Vera, Miguel Cabrera, Elena Baeza, Leire Iriarte, Miguel Latorre, María Prado Rubio, Reginald García, Luis Ortiz, Timo Merilainen, Bárbara Fernández Guijarro, Claudia Sousa, Cristina Daniel, Luis Unas, Diogo Falcao, Sonia Figo, Mikael Poissonet, Arnaud Villette, Raffaele Cavalli y Raffaele Spinelli.

Y finalmente, pero con un especial cariño y nuestros mejores deseos de futuro éxito, a los jóvenes alumnos de últimos cursos y recién titulados que han trabajado en la toma de datos de estas experiencias, aportando no sólo su fuerza de trabajo sino también su entusiasmo y sus buenas ideas. Comenzaremos por los pioneros, Edgar Sánchez-Redondo y Sergio Flores (como ellos dirían, *still fighting*), para seguir con Elena Lianes, Tania García-Bravo, Ana Navas, Manolo Venta, Luis Garoz, Javier Guinea, Arce Arnanz, Laura González, David Donaire, Luisa Valdés, Javier Caravaca y Raquel Cuesta, sin olvidar a los que al cerrar esta edición siguen aún colaborando con nosotros, junto con Marina Martín: Carolina Poncela, Carlos Vaca e Irene Zaragoza. Sin el esfuerzo de todos ellos, el control de los trabajos sobre los que trata este manual no habría podido realizarse.

Gracias a todos vosotros, de corazón, y nuestras más sinceras disculpas a aquellos que pudiéramos haber omitido involuntariamente de los agradecimientos de un proyecto que ha implicado tantísimas voluntades.

En Madrid, a 20 de julio de 2009

Eduardo Tolosana

INTRODUCCIÓN

Se puede definir la biomasa como “Materia orgánica en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente directa o indirecta de energía” (Vocabulario Científico y Técnico. Real Academia de Ciencias, Exactas, Física y Naturales. Madrid, Espasa Calpe, 1990).

El presente Manual se refiere a la biomasa forestal primaria, que sería la producida directamente como consecuencia de procesos fotosintéticos, por los vegetales, generalmente leñosos, que forman las masas forestales. Parte de esa biomasa se emplea para su transformación industrial en productos forestales, entre los que destacan la madera maciza, el papel de fibra virgen y los diferentes tableros de desintegración, acompañados por multitud de productos no maderables. Otra parte puede emplearse, y de hecho se ha empleado y se emplea con frecuencia, para producir energía térmica o transformarse en otras fuentes de energía, en forma de carbón, gas o electricidad.

La actual subida de los precios de los combustibles fósiles ha hecho que la humanidad vuelva su mirada hacia las llamadas energías renovables, donde, en el marco de una gestión forestal técnica –por descontado, sostenible–, se encuadraría el uso de la biomasa forestal procedente de residuos de aprovechamientos forestales o aprovechamientos integrales de especies no comerciales.

El objetivo de este Manual es aportar información y criterios operativos acerca de los materiales y técnicas de aprovechamiento de la biomasa forestal primaria, concretamente de la que se produce en los montes de forma espontánea –es decir, no incluyendo los llamados cultivos energéticos, que por sus costes de establecimiento, necesidad de cuidados intensivos y turnos cortos, constituyen un apartado a medio camino entre lo forestal y lo agrícola–. Se presenta información y referencias sobre tecnología, técnicas de trabajo, rendimientos y costes y aspectos complementarios.

El Manual está orientado especialmente al ámbito forestal castellanoleonés, dado que buena parte de las recomendaciones y datos que contiene proceden de experiencias de aprovechamiento analizadas por el equipo redactor del texto básicamente en Castilla y León, con apoyo técnico y financiero de la Junta de Castilla y León y de la Fundación CESEFOR. No obstante, la mayor parte del contenido tiene utilidad en el conjunto del territorio español. Los destinatarios son los interesados en este nuevo aprovechamiento –nuevo en cuanto a sus técnicas y tecnología–, es decir, propietarios forestales, técnicos de empresas y Administracio-

nes, empresarios y trabajadores forestales y otros interesados en la gestión, aprovechamiento y conservación del medio forestal.

El texto se estructura, a partir de la definición de los principales Sistemas de Aprovechamiento de la biomasa forestal, en un capítulo destinado a la maquinaria empleada para la recolección y tratamiento de la misma. Siguen al capítulo de Maquinaria dos apartados dedicados, respectivamente, a los impactos ambientales negativos y las medidas preventivas y correctoras para evitarlos y a las prácticas recomendables desde el punto de vista de seguridad y salud. A partir de estas partes de contenidos generales, se suceden seis capítulos dedicados a aprovechamientos de determinados tipos de masas forestales, a saber, resalveos en montes bajos de rebollo, clareos en repoblaciones jóvenes, cortas finales en choperas, cortas “a hecho” o casi en pinares, extracción de tocones de diferentes tipos de montes, trituración de restos de tratamientos selvícolas en pinares o masas mixtas y aprovechamiento de restos de poda (leña o sólo retazo) en masas adhesionadas de encina.

Finalmente, se dedica el último capítulo al análisis de las políticas de fomento del uso energético de la biomasa en los tres países europeos más próximos, por tamaño y situación geográfica, a España, y al reflejo de esas políticas, junto a los factores intrínsecos de orden climático o histórico, en la situación de este aprovechamiento, como base de una serie de recomendaciones sobre esas medidas de incentivación de la oferta de biomasa forestal para uso energético, de apoyo a su demanda o de carácter transversal.

FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL PRIMARIA

Se conoce como “Sistema de Aprovechamiento” a un conjunto concreto de operaciones y medios, definidas por su naturaleza, su orden de ejecución y los lugares y tiempos en que las operaciones tienen lugar, que dan lugar al aprovechamiento de los productos forestales.

En el caso de los productos maderables, los sistemas de aprovechamiento se suelen agrupar por la forma en que la madera se extrae del monte, en sistemas de árboles completos, partes de árbol, fustes enteros, madera corta o larga, y sistema de astillas (Tolosana *et al.*, 2004).

Se describen de forma esquemática, a continuación, los principales sistemas empleados para el aprovechamiento de la biomasa forestal primaria con fines energéticos.

1.1. Sistema de aprovechamiento de árboles completos y astillado fijo (en cargadero) para claros y cortas selectivas de masas no comerciales

Este sistema se basa en el siguiente esquema de operaciones, que se ilustra en las *Figuras 1 y 2*:



Fig. 1: Multitaladora trabajando en un abedular sueco.



Fig. 2: Pila de árboles completos secándose en cargadero antes de su astillado.

- a.- Apeo con taladora acumuladora (“multiárbol”) o con cosechadora convencional de árboles de tamaño pequeño o medio (excepcionalmente con motosierra si son muy pequeños).

- b.**– Desembosque en autocargador de árboles completos o “partes de árbol” y apilado para presecado en cargadero.
- c.**– Astillado o triturado “fijo” en cargadero, generalmente sobre contenedor, sobre camión o en el suelo, con astilladora /trituradora incorporada en camión (el transporte de árboles directamente a planta es una alternativa si las distancias son pequeñas, de menos de 20 a 30 km).

En España, se debe considerar un sistema de posible aplicación a resalveos de especies sin aprovechamiento comercial, especialmente quercíneas, a clareos de especies comerciales (pinos, hayas...), e incluso a claras –las llamadas “entresacas” sobre especies comerciales, en competencia con usos consolidados (industrias de trituración). La maquinaria actual específica (multitaladoras, autocargadores con remolques extensibles o compresores, etc.) es todavía escasa, aunque no inexistente (*vid.* Tolosana *et al.*, 2008a).

En cuanto a los costes de este sistema, referencias escandinavas (SYDVED, 2005) apuntan a un coste de extracción de 8,25 € por tonelada verde, el astillado supondría otros 11,55 €/t, y para el resto de operaciones (apeo y apilado y, en su caso, retribución por la materia prima a la propiedad), quedaría un margen de 13,20 €/tonelada (siempre verde).

En cualquier caso, estas intervenciones están subvencionadas en los países nórdicos, lo que representa un estímulo tanto para la propiedad como para la empresa ejecutora.

Estas cifras lo hacen más caro que otros sistemas, por el menor tamaño de los materiales a manipular, el carácter selectivo que hace más delicadas las operaciones y, sobre todo, la menor producción por hectárea (equivalente a 30-50 MWh/ha, Kallio y Leinonen, 2005).

Las perspectivas de este sistema de trabajo, ante el aumento de la demanda de biomasa, son favorables. La subida de precios hace que operaciones antes poco comunes estén entrando en rentabilidad: en 2005, había en Suecia 20 unidades de cosechadora múltiple, con tendencia a aumentar (SYDVED, 2005). En Finlandia, se estimaba que su número pasaría de 49 en 2002 a 189 en 2005 (Ala-Fossi, 2005). Recientemente, el número de multitaladoras ha sido evaluado en 2007 como un 44% de los 180 máquinas que se dedicarían al apeo de árboles pequeños con fines energéticos, mientras que el resto tendrían cabezales convencionales con capacidad de alimentación, es decir, más polivalentes (Kärhä, 2007).

En las experiencias que sirven de base a este Manual, se ha ensayado este sistema de trabajo en clareos y claras sobre repoblaciones, así como en resalveos o entresacas de montes bajos de rebollo, con cabezales cosechadores convencionales o adaptados para su uso como multitaladores.

1.2. Sistema de aprovechamiento de residuos de cortas a hecho, seguido de su astillado o triturado fijo (en cargadero)

Es un sistema en que se considera fundamental la adecuada separación y amontonado de los residuos durante el aprovechamiento, por lo que debe coincidir o estar muy relacionada la empresa que extrae la madera con la que aprovecha la biomasa, para dejar el residuo concentrado y, en lo posible, libre de arena o barro (sin ser pisado por las máquinas o arrastrado indebidamente).

Fundamentos de los sistemas de aprovechamiento de biomasa forestal primaria

En los países escandinavos, las cortas finales suelen llevarse a cabo de forma mecanizada, con lo que es la misma cosechadora (la que en España se suele llamar “procesadora”) la que deja las ramas y copas amontonadas o incluso más o menos acordonadas. Estas cortas tienen mayor producción de peso de biomasa por hectárea que los klareos y, dado que ese es el factor clave sobre los costes, resultan más económicas. En ellas, la media de astilla verde obtenida equivale a 100 MWh/ha, más en masas de abeto rojo (*Picea abies*), algo menos en pinares de pino silvestre o masas de otras especies.

Después de la corta, el apilado de madera y el amontonado de los residuos, y de la saca de madera, el desembosque de los restos de corta se lleva a cabo en autocargador, a veces con compresor (tipo llamado *Havu-Hukka* en Finlandia) o con remolque de gran capacidad –con teleros que aumentan su ancho y altura–, dado que la densidad de los restos rara vez supera los 150 kg/m³, lo que penaliza estas fases de transporte extraviario, al igual que el coste de transporte de la biomasa bruta a la planta en camiones.

Una fase que no se suele eludir nunca en los países nórdicos es el pre-secado de la biomasa en cargadero o borde de pista, para que, al reducirse su humedad, gane poder calorífico y simultáneamente pierda parte de las hojas o acículas que hacen reducirse su calidad como combustible.

Finalmente, se produce el astillado “fijo” en cargadero, generalmente sobre contenedor, camión o en el suelo, casi siempre con astilladora incorporada en un camión. Si las distancias a planta fueran muy pequeñas, al igual que en el sistema anterior, se puede llevar acabo el transporte directo de la biomasa bruta a la planta, donde su astillado es bastante más económico que en cargadero y permite un mejor control de la calidad de la astilla. Las fases de este sistema de aprovechamiento de biomasa se reflejan en las fotografías de las Figuras 3 a 5.



Fig. 3: Desembosque de restos de corta a hecho con autocargador.



Fig. 4: Pre-secado de una pila de residuos de corta hecho en un cargadero.

En el estado español, se podría aplicar este sistema a las cortas a hecho o casi de pinares, allí donde se aplica parcial o totalmente esta modalidad de cortas de regeneración (Galicia, País Vasco, Soria y Burgos, Segovia...), a las cortas a hecho de eucalipto (Cornisa cantábrica, oeste de Andalucía), a las cortas a hecho de chopos (varias cuencas, especialmente Duero, zonas del Ebro, área de Granada...). En España y Portugal, hay un número pequeño de astilladoras de tambor remolcadas por camión, si bien este número ha sido netamente creciente en los últimos meses.



Fig.5: Astilladora sobre camión, que hace astillado fijo de restos de cortas a hecho de pino en Portugal.

Se considera en los países escandinavos como el esquema más económico en montes grandes, y es también el que mejor se adapta al mal tiempo invernal (se puede sacar el residuo y el astillado es a borde de pista).

Según SYDVED (2005), una referencia de costes podría ser la siguiente:

- Extracción: 6,55 €/t.
- Astillado: 13,55 €/t.
- Resto (Apilado residuo y, en su caso, retribución de madera en pie): 13,10 €/t (siempre verde).

Según otras fuentes, los costes totales sin contar madera en pie supondrían una media de 8.4 €/MWh frente a 12.8 €/MWh en klareos (Kallio y Leinonen, 2005).

En las experiencias en que se basa el presente texto, se ha ensayado este sistema en cortas a hecho de pino silvestre y pino resinero, y otros tipos de tratamientos selvícolas sobre pinares y masas mixtas, mientras que en las cortas a hecho de chopo se ha optado por un sistema más próximo al que se definirá como “astillado móvil”, si bien en la práctica se ha tratado de un sistema mixto entre aquel y éste.

1.3. Sistema de aprovechamiento de residuos de cortas a hecho por astillado móvil (en monte), también llamado “sistema de aprovechamiento de astillas”

Al igual que en el sistema previo, es fundamental la separación adecuada durante el aprovechamiento, dado que hay que dejar el residuo lo más concentrado que sea posible y libre de

Fundamentos de los sistemas de aprovechamiento de biomasa forestal primaria

pedras o barro. De nuevo, interesa que las empresas que aprovechan la madera y el residuo sean la misma o tengan una relación estrecha.

En este caso, el presecado del residuo se suele producir en monte, lo que tiene consecuencias positivas desde el punto de vista de la devolución al suelo de la mayor parte de los nutrientes, si bien sería difícil de asumir en determinadas regiones españolas por riesgos de plagas o incendios.

El astillado se lleva a cabo por medio de una astilladora móvil, remolcada por tractor agrícola o preferentemente integrada en autocargador, que transita por el interior de la masa forestal, va recogiendo los residuos con su propia grúa y alimentando la astilladora que proyecta la astilla hacia un contenedor cerrado que remolca.

Cuando éste se ha llenado, se produce el desembosque en el propio vehículo de astillado o en un vehículo auxiliar con remolque (llamado lanzadera o “shuttle”) si las distancias de saca son mayores –en montes medianos o grandes–. Lo más común es que la descarga se produzca en contenedores para transporte en camión, basculando la astilladora móvil o el vehículo lanzadera su propio contenedor, más pequeño, en el contenedor de transporte, que en los países escandinavos se suele llevar a cabo en camiones *multilift* con remolque.

Las fases de este sistema de aprovechamiento se ilustran en las *Figuras 6 a 9*, a continuación.



Fig. 6: Procesado mecanizado en corta a hecho, separando madera y residuos para biomasa.



Fig. 7: Cordones separados de madera y restos dejando una calle para que la máquina no los pise.



Fig. 8: Astilladora móvil acompañada por vehículo lanzadera para la saca de astillas.



Fig. 9: Basculado de contenedor de monte en lanzadera para la saca de astillas.

Las posibilidades de aplicación de este sistema al aprovechamiento de biomasa en el caso español serían, en principio, las mismas que el sistema anterior, es decir, las cortas a hecho.

En Escandinavia, se considera el esquema más económico en montes medianos (por sus menores costes fijos al emplear una sola máquina), aunque el rendimiento del astillado se reduce mucho con respecto al astillado en fijo, en cargadero, debido a la mayor dificultad de carga a partir de montones pequeños, repartidos por el suelo forestal, frente a la carga desde un gran pila situada en un cargadero con buenas condiciones de acceso y movilidad.

A su vez, las astilladoras integradas en autocargadores son máquinas más caras, a igualdad de potencia, que las remolcadas en camiones, por lo que los costes suelen ser netamente mayores en este esquema, que de hecho se considera en cierta regresión (Kärhä, 2007).

Si bien, si se aplica adecuadamente, los costes pueden llegar a ser similares a los del sistema de astillado fijo, aquel reduce costes claramente en montes grandes.

En España, el parque de astilladoras móviles es reducido, las empresas más activas son las del chopo, que es donde se han llevado a cabo las experiencias completas de aprovechamiento que se describen más adelante en este Manual. También se han llevado a cabo estudios de astillado móvil en cortas a hecho de pinares en Galicia por CIS-Madeira (Sanz y Piñeiro, 2002).

1.4. Sistema de aprovechamiento: empacado de residuos y astillado en fábrica

Consiste en la recogida de los restos, normalmente también en cortas a hecho, mediante una máquina llamada empacadora, que elabora fardos o pacas comprimiendo los restos por diferentes sistemas, y los deje atados con cuerdas o alambres, con una densidad muy superior a la de los residuos brutos y bastante mayor que la de las propias astillas, con lo que se obtienen ventajas en costes de transporte.

El problema conceptual de este sistema es que la empacadora es una máquina muy cara, que puede incrementar el coste del proceso entre 6 y 12 € por tonelada verde, sin aportar valor añadido al producto, sino meramente abaratar los costes de transporte y manipulación.

En Finlandia, donde este esquema está más desarrollado, se considera un esquema adecuado para grandes centrales y co-combustión, que tienen radio de abastecimiento grande y son menos exigentes en humedad y presencia de impurezas que las pequeñas plantas térmicas y que además tienen astilladoras en planta.

La principal ventaja es que emplea los mismos medios (autocargadores, camiones) que para la madera, reduciendo problemas logísticos, y que al aumentar la densidad abarata costes de transporte y manipulación en distancias medias o largas. El tipo de maquinaria empleada puede trabajar en montes de condiciones fisiográficas medias, con pistas de acceso en mal estado, y no requiere cargaderos tan grandes como los esquemas de astillado fijo o móvil.

A pesar de su desarrollo de 10 años en Finlandia, el número estimado de máquinas operativas en 2007 se estimaba en 12 (Kärhä, 2007). En España, parece haber cierta densidad de este tipo de máquinas en Cantabria y Asturias (9 unidades de Timberjack-John Deere). Hay, además, algunas unidades de fabricación nacional (TRABISA, MONRA FORESTAL) y un prototipo en desarrollo (FORESTPACK).

Las fases y máquinas del sistema se muestran en las *Figuras 10 y 11*.



Fig. 10: Empacadora trabajando “en móvil”, con restos de corta a hecho.



Fig. 11: Autocargador extrayendo pacas de forma similar a trozas de madera.

Entre las experiencias en que se basa el presente manual, sólo se ha empleado el sistema de empacado en una clara de San Esteban de Gormaz, en que se utilizó con motivo de las demostraciones de la feria Expobioenergía 2006, si bien el tipo de masa y de corta no eran las más adecuadas para estas máquinas, que por sus dimensiones se conciben más bien como máquinas de cargadero (al menos, en cortas selectivas) o máquinas de monte en cortas a hecho en lugares favorables.

Es más frecuente el primer caso, luego antes del empacado se debería producir el desembosque de los restos, como en el caso del astillado fijo, es decir, empleando un autocargador. En caso de trabajar “en móvil”, sería la saca de las propias pacas la que se llevaría a cabo con autocargador (*Figuras 10 y 11*).

También se emplea en eucaliptares, especialmente en la zona de Huelva, con la siguiente secuencia: extracción de tocón con retroexcavadora equipada con un apero especial con “uña” –acopio a borde de pista– cizallado al cabo de cierto tiempo de acopio –carga en transporte– pretriturado en parque logístico o de fábrica.

En España, por tanto, sus posibles aplicaciones se centrarían en cortas a hecho, al igual que los sistemas anteriores. Se han llevado a cabo diversos ensayos de empacado, tanto con máquinas escandinavas como nacionales, por parte de CIS-Madeira, ANFTA, el CENER, EGMASA y el CREAM, este último junto al CENER y otros socios en el seno del Proyecto Rebrot-e.

En cuanto a las referencias sobre costes en los países nórdicos, según Asikainen (2004), el coste total sería de 15,6 €/m³, incluyendo transporte –80 km– y astillado en planta. Para una densidad de 450 kg/m³ (verde), esto supondría 34,67 €/t puesta en planta –costes directos–. Según Fraysse (AFOCEL, 2005), usando la Timberjack Fiberpack, el coste en un caso estudiado en Finlandia para una caldera que consume 1500 GWh, 300 de ellos de restos forestales en un radio de 140 km, es de 9,5 €/MWh, incluyendo transporte –85 km–, astillado y costes fijos.

En la *Tabla I*, se presentan los costes obtenidos en varios ensayos llevados a cabo por las empresas de tableros (Navarro, 2005). Se puede apreciar cómo, con la materia prima sujeta a precio cero, las pacas tienen un coste estimado, puestas en fábrica, entre 33 y 47 €/t, para un poder calorífico de las ramas, al 50% de humedad, de 2.500 Kcal/kg. En otras expe-

riencias, como las del CENER en Navarra, se han obtenido resultados con chopo en que el empacado supuso 13,55 €/t y, en pino, 19,21 €/t, siempre en verde (CENER, 2005).

MAQUINARIA (€/tm.)	FIBERPAC (chopo)	FEBERPAC (pino)	WOODPAC (pino)	TRABISA (pino)
Pala/Tractor apilador de ramas	3,5	2,3	–	2,5
Empacadora de ramas	25,0	30,0	9,0	10,0
Autocargador	4,5	10,0	6,0	6,0
Camión (distancia a fábrica)	5,0 (50 km)	5,0 (50 km)	18,0 (140 km)	15,0 (110 km)
TOTAL	38,0	47,3	33,0	33,5

Tabla I: Costes estimados para el empacado de restos en cortas a hecho, pruebas de ANFTA (Navarro, 2005).

1.5. Sistema de aprovechamiento de tocones: Extracción y transporte a fábrica, con posible pretrituración

Se evalúa en los países nórdicos como un sistema de mayor coste que los alternativos, justificado en *Picea abies* por la gran producción en peso (más de 90 t/ha) y por la necesidad de tratamiento en algunas masas con problemas sanitarios.

Se está ampliando su uso por el aumento de demanda en estos países. Se compone de:

- Extracción con retroexcavadora adaptada, con un apero en punta de grúa que presenta una especie de cizalla que parte el tocón a la vez que lo extrae, propiciando que se limpie de piedras
- Pretrituración lenta (a veces seguida de trituración) previa al transporte tras un periodo de secado-

En muchos casos – en los países nórdicos, en su mayoría - se transportan en bruto y los tratan en fábrica desde el principio. Se presentan algunas fotografías que ilustran las fases de este sistema de aprovechamiento en las Figuras 12 a 14.



Fig. 12: Retroexcavadoras extrayendo tocones tras corta a hecho de *Picea*.



Fig. 13: carga de tocones en máquina pretrituradora.



Fig. 14: carga directa de tocones en ferrocarril.

Normalmente, se consume por clientes grandes que le dan tratamientos secundarios (limpieza, triturado y/o astillado definitivo).

En España, sería un sistema de aplicación en obras de infraestructuras y en choperas, en que a veces se produce destocoñado, y su uso se ve facilitado por la existencia de numerosas máquinas pretrituradoras, tanto en fábricas de áridos, recuperadores de residuos, etc..

Entre las experiencias en que se basa el presente manual, se incluyen varias de destocoñado en infraestructuras (una pista y una autovía) y un caso de destocoñado de choperas.

Como referencias nórdicas de costes, según Laitila *et al.* (2006), el coste total de los tocones en fábrica sería de 23,0 €/m³ sólido, incluyendo transporte –80 km–. Esto supondría entre 3 y 4 € más que en el caso de los residuos de cortas a hecho, debido a que el coste de arranque de los tocones supone 4 a 6 €/ m³ sólido –para un volumen por tocón de abeto rojo de 150 a 200 dm³–. Según el mismo autor, una razón adicional para la economía de este sistema es que ahorra costes de preparación del terreno.

En suma, se considera que es el sistema de suministro que más crecerá, aunque se considera adecuado para grandes consumidores, por la baja calidad y elevada impureza del combustible.

LA MAQUINARIA EMPLEADA PARA EL APROVECHAMIENTO Y ELABORACIÓN DE BIOMASA FORESTAL

2.1. Máquinas para la reducción del tamaño de la biomasa

2.1.1. Pretrituradoras

Se trata de máquinas diseñadas para el tratamiento de áridos y de residuos sólidos urbanos, que se emplean también para residuos de madera usada (palés, envases, etc.), cuyo objetivo es triturar hasta tamaños no muy finos materiales duros o que pueden contener clavos u otros metales, piedras, etc.

Por ello, su mecanismo es muy robusto y resistente, y no actúa por corte sino por rotura por presión con superficie roma. Lo más común es que estas máquinas tengan alimentación superior directa sobre el órgano de trabajo, que está constituido por uno o dos tornillos lentos muy robustos, dispuestos horizontalmente, de forma generalmente paralela al eje longitudinal de la máquina y con longitudes que frecuentemente superan los 3 metros, equipados con dientes fijos que rompen el material en fragmentos grandes.

En el caso de equipos de un solo tornillo, sus dientes actúan contra unas contracuchillas que están constituidas por piezas dentadas o en forma de peine del propio bastidor de la tolva, por cuyos huecos entran los dientes del tornillo giratorio.

En el caso de doble tornillo, los dos tornillos giran en sentido contrario, enfrentando los dientes de cada rodillo, que penetran en los huecos entre los dientes complementarios del otro y actúan así como martillo y contracuchilla simultáneamente, además de triturar contra las piezas fijas de ambos laterales del bastidor (*Figura 15*).



Fig.15: Útil pretriturador.



Fig.16: Pretrituradora semimóvil.

Aunque hay equipos móviles (como la *Forus Holzbrecher*, acoplable a autocargador y con grúa propia que emplea Tragsa desde hace más de 10 años para triturar y dispersar residuos forestales), la mayoría de estos equipos son semifijos, acoplables a camión, pero se pueden separar del mismo, puesto que están generalmente concebidos para su trabajo en cargadero o parque de fábrica. En algunos casos, cuentan con mecanismos que les permiten cierta movilidad en un parque o cargadero, como orugas para pequeños desplazamientos (*Figura 16*), o rodillos que actúan sobre las ruedas, permitiendo desplazamientos lentos y no muy largos. En estos casos, algunos fabricantes prefieren definir las máquinas como semimóviles, y generalmente tienen ventajas logísticas en cargaderos forestales, en que se enfrentan con largos montones de material y, caso de no poder desplazarse, habría que alimentar la máquina desde lejos y además, garantizar un medio de evacuación rápida del pretriturado que se fuera produciendo. Una ventaja de estos equipos frente a las astilladoras es que el material es demasiado grueso para tener riesgo de autocombustión por reacciones anaerobias en el interior de los montones. Por ello, y paradójicamente a pesar de ser más grueso, seca más rápidamente que las astillas.

Lo normal es que estos equipos no dispongan de grúa, y en su uso habitual por la industria se suelen complementar con palas cargadoras de alto volteo o con grúas de tipo pulpo, para su carga superior. Frecuentemente, estos equipos cuentan con una cinta transportadora-elevadora, destinada a depositar el material pretriturado en la tolva de otra máquina (o en un montón). A veces, en el transporte de material hasta su salida, se interpone una criba para rechazar los materiales más gruesos, que serían reintroducidos en la máquina.

El uso forestal de estos equipos se restringe a los casos en que la presencia de piedras o metales no sólo impide el uso de equipos de cuchillas, sino que produciría un desgaste excesivo en las trituradoras de dientes locos o martillos. Por ejemplo, los tocones serían un caso de material con abundantes piedras, adecuado para este tipo de equipos. Otro ejemplo serían los palés, por su contenido en clavos.

Estas máquinas están concebidas, al menos cuando se usan para producir materiales combustibles, para su empleo en serie con otras, por lo que suelen ir seguidas de cribas o separadores (trómeles, sopladoras, electroimanes, etc., dependiendo de los casos) y de trituradoras que producen un material más fino, una vez separadas las impurezas.

Su funcionamiento por presión, y el tener que trabajar con materiales muy duros (áridos, metales, piedras,...) hace que sean normalmente máquinas de gran potencia, lo que origina mayores costes y consumos que las máquinas alternativas. Además, requieren normalmente un post-proceso, con lo que el valor añadido que aportan es inferior a las máquinas que pueden originar un producto de consumo final, como con frecuencia ocurre con las astilladoras. Como relativa ventaja con respecto a estas últimas, se puede decir que su mantenimiento es menos frecuente y costoso que el de las máquinas de cuchillas, si bien es cierto que se enfrentan con frecuencia a averías graves, por el tipo heterogéneo y complejo de materiales a los que tratan.

2.1.2. Trituradoras

Se trata de máquinas diseñadas para reducir el tamaño de materiales no muy duros, a los que atacan por impacto de piezas metálicas, a menudo móviles (martillos o dientes articulados,

a veces con refuerzos de materiales más duros y/o con cierto filo o dentición en sus bordes de ataque, como se aprecia en la *Figura 17*, en que los dientes no son articulados), montadas en la periferia de un cilindro giratorio que funciona a gran velocidad (no como los rodillos lentos de las pretrituradoras) con el fin de aprovechar la fuerza centrífuga para dar más efectividad al impacto del martillo o diente sobre el material a triturar.

Lo más común es que estas máquinas tengan los martillos o dientes montados sobre un rodillo metálico que gira alrededor de un eje horizontal que se dispone normalmente de forma perpendicular al eje longitudinal de la máquina, por lo que la longitud del rodillo triturador no suele superar los 2 ó 2,5 metros. Es un órgano análogo al que montan las desbrozadoras de martillos de eje horizontal.

Es común que el sistema de alimentación sea mixto, compuesto por una cinta transportadora horizontal, que se desplaza en el sentido del eje longitudinal de la máquina, en dirección a la situación del rodillo de alimentación que completa esta labor (normalmente la cinta se encuentra como base de buena parte del remolque, en el caso frecuente de ser la trituradora remolcada por un camión, mientras que el rodillo de alimentación, giratorio y dentado, se encuentra en la parte delantera o trasera del remolque, es accionado por uno o dos cilindros hidráulicos para presionar y arrastrar los materiales empujados por la cinta contra el órgano triturador, que está cubierto para evitar las proyecciones).

En el caso más frecuente, la alimentación también es superior y/o trasera: o bien se depositan los materiales a triturar sobre la cinta o, preferentemente en el caso de materiales forestales largos, como árboles completos o copas, se empujan con la grúa en dirección al cilindro de alimentación. Por tanto, es normal que, al menos para usos forestales, se alimente con una grúa, que puede estar integrada en el conjunto o pertenecer a un vehículo auxiliar (*Figura 18*).



Fig. 17: Tambor de trituradora Pezzolato



Fig. 18: Alimentación y salida de producto de una trituradora semimóvil trabajando con árboles completos.

Algunas trituradoras presentan también, como las pretrituradoras, una cinta transportadora-elevadora para la evacuación del material triturado, así como cribas para rechazar materiales demasiado gruesos.

Como se ha señalado, y al igual que en el caso de las pretrituradoras, es frecuente que sean remolcadas por un camión, es decir, semifijas, aunque algunas tienen, además, la capacidad de pequeños desplazamientos por medio de orugas o rodillos de tracción accionables por mando a distancia –es decir, son semimóviles–.

En cuanto a sus usos forestales, estas máquinas tienen, como las pretrituradoras, la ventaja de un posible uso mixto por la industria, y tienen también mayor tolerancia que las astilladoras a materiales “sucios”, con arena o pequeñas piedras, si bien los materiales con grandes piedras o abundantes metales dan problemas de desgaste de los martillos o dientes, que son caros de sustituir.

2.1.3. Astilladoras

Son máquinas que están diseñadas para el ataque a materiales blandos, generalmente árboles, madera o productos de madera sin contener elementos duros, que reducen la madera sólida a partículas mediante un mecanismo de corte con cuchillas (en un número pequeño de casos, mediante tornillos con aletas de bordes afilados). Las cuchillas se montan sobre elementos rotatorios con velocidades angulares relativamente altas. Las máquinas que tienen aplicaciones forestales no industriales son astilladoras de disco o de tambor.

2.1.3.1. - Astilladoras de disco

Tienen las cuchillas montadas radialmente en un disco giratorio, sobresaliendo ligeramente con un cierto ángulo sobre la superficie del disco, que normalmente actúa también, por medio de unas aletas dispuestas en su cara opuesta, como ventilador o ciclón, para enviar las astillas proyectadas a través del tubo de la cañonera (*Figura 19*).

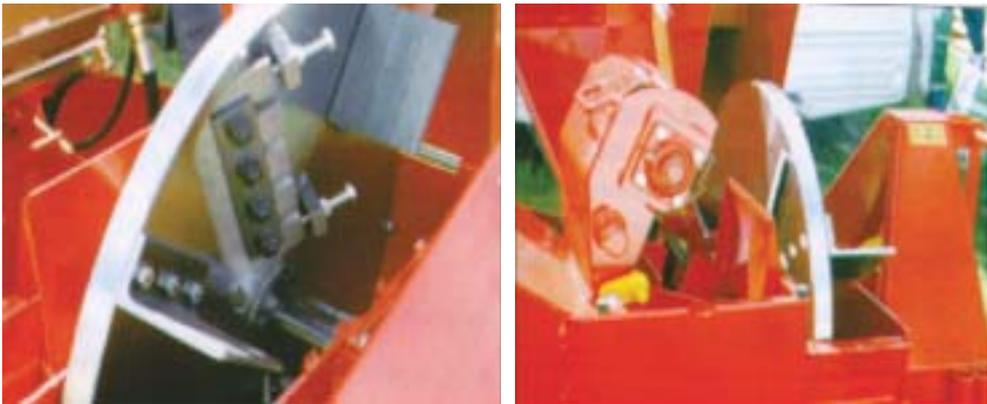


Fig. 19, a y b: Detalles del disco, cuchillas y palas del ciclón ventilador.

En estas máquinas, las cuchillas atacan tangencialmente a los troncos, con lo que las astillas son de peor calidad y mayor relación longitud-grosor. Las astilladoras de disco son las más habitualmente empleadas para la eliminación de residuos, dado que la calidad de la astilla tiene menor importancia y que sus requerimientos de potencia, especialmente para materiales como ramas o copas que no son muy grandes, no son tan altos como para su empleo industrial. Además, a igualdad de potencia y velocidad, sus rendimientos en materia astillada son mayores.

Para este uso, son normales los equipos móviles, acoplables a toma de fuerza de tractor

Maquinaria empleada para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal

agrícola de entre 70 y poco más de 100 CV. La alimentación es con frecuencia manual o mecanizada mediante grúas hidráulicas ligeras, en cuyo caso el tractor tiene algo más de requerimiento de potencia (*Figura 20, a y b*).

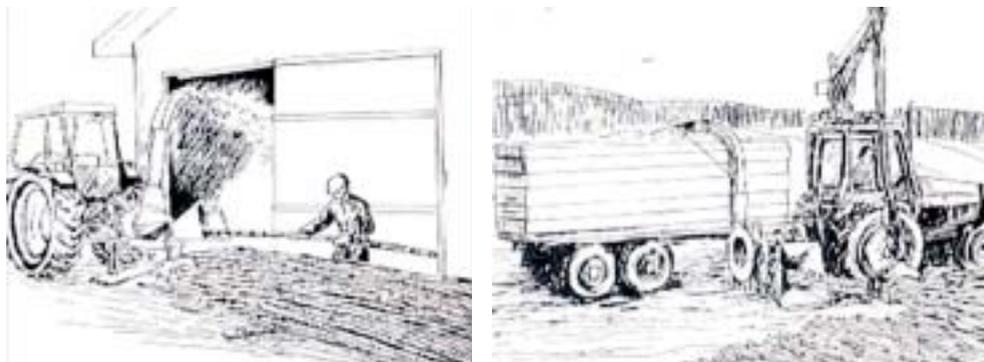


Fig. 20, a y b: Ejemplos de alimentación manual y mecanizada (Fuente: V. M. González, 1987).

2.1.3.2 - Astilladoras de tambor

Son las más empleadas para la elaboración de biomasa de origen forestal, y su órgano de corte es un cilindro rotatorio o rotor con una longitud entre 900 mm y algo menos de 2 metros, con dos a cuatro cuchillas de disposición tangencial, que actúan contra una contracuchilla de presión (*Figura 21*) y sobre el material, que es frecuentemente empujado por un rodillo de alimentación dentado. El diámetro del rotor limita el diámetro del material a astillar, que está comprendido entre $1/3$ y $2/5$ de aquel.

Aunque su velocidad es similar a la del disco de las astilladoras de disco, sus requerimientos de potencia son bastante mayores, por lo que su rendimiento es menor, si bien la calidad de la astilla proporcionada, al ser el corte perpendicular al eje de las fibras, es mayor, y la astilla producida es más homogénea y tiene una relación longitud-anchura menor. A diferencia de las astilladoras de disco, el ciclón para impulsar las astillas por la cañonera es independiente del rotor.

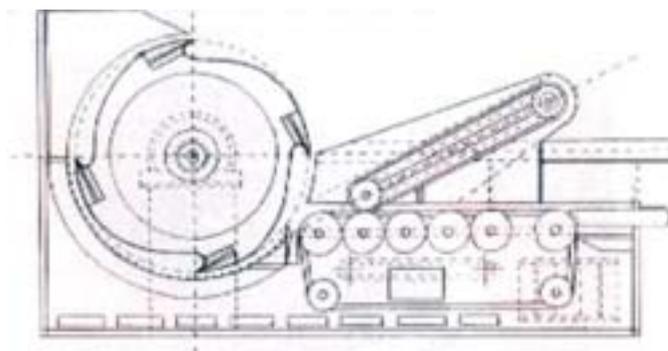


Fig. 21: Esquema de funcionamiento de una astilladora de tambor.

Son las más usualmente empleadas para biomasa forestal y se pueden montar como máquinas semifijas, remolcadas por un camión, con características de movilidad similares a las trituradoras o pretrituradoras estudiadas (aunque suelen trabajar en presencia de la cabeza tractora, abundando menos las máquinas semi-móviles), o como máquinas móviles. En el primer caso, siempre llevan un motor propio y, aunque por su mecanismo de actuación requieren menos potencia y consumo que las trituradoras o pretrituradoras, suelen tener potencias superiores a los 300 CV.

Si son móviles, pueden ser acoplables a un tractor agrícola de cierta potencia (normalmente, más de 100 CV y con frecuencia más de 150) o bien pueden ser acoplables o estar integrados en el chasis de un autocargador, caso en el que suelen contar con un potente motor propio. En este último caso, la alimentación siempre es mecanizada, con una grúa hidráulica, y la tolva o mesa de alimentación puede ser lateral o frontal, lo que tiene importantes consecuencias en la organización del trabajo, en monte y especialmente en cargadero. Normalmente, al igual que en las trituradoras, el sistema de alimentación es simple, con un solo rodillo de alimentación (*Figura 22*), o con menos frecuencia mixto, compatibilizando una cinta transportadora con un rodillo de alimentación.



Fig. 22: Mesa alimentadora de astilladora móvil. Fig. 23: Astilladora móvil con contenedor basculante.

A efectos de su uso forestal, tiene mucha trascendencia la longitud y anchura de esa mesa alimentadora, dado que debe recibir materiales largos y anchos e incorporarlos eficazmente, reduciendo rechazos y operaciones reiterativas de alimentación que suponen muchos tiempos muertos si la mesa de alimentación no es adecuada. También es importante que el rodillo de alimentación sea reversible automáticamente, permitiendo expulsar el material en caso de atasco.

En todo caso, la astilladora móvil debe remolcar un contenedor de astillas, dado que su función es obtener las astillas en el interior de la masa, y no expulsarlas (*Figura 23*). Si se trabaja en montes grandes, con mayores distancias de desembosque y mayores costes fijos, es conveniente que el contenedor de astillas sea basculante, como el de las *Figuras 9 ó 23*, para permitir que sea un vehículo lanzadera auxiliar, más barato, el que desembosque las astillas, propiciando que la astilladora móvil se dedique a astillar.

En el caso de las astilladoras móviles, la grúa hidráulica debe estar integrada en el mismo vehículo que porta la astilladora y el contenedor de astillas. En las astilladoras fijas, esto no

siempre es así, aunque sea también conveniente. Aquí tiene mucha importancia el tipo de grúa, debiendo ser de tipo pulpo o, al menos, sin los travesaños longitudinales propios de las grúas de carga de madera, si se van a cargar ramas o material sin una dimensión predominante. Las grúas de madera pueden servir para árboles completos o copas de cierta longitud, si bien siempre suele interesar que tengan una mayor apertura máxima.

2.2. Máquinas de cribado y separación de materiales

Las cribas, asociadas o no con separadores u otras máquinas de refinado de materiales incongruentes, son máquinas fijas o semifijas (en ese caso, remolcadas generalmente por una cabeza tractora de camión), cuyo fin es clasificar los materiales por granulometría y, en algunos casos, mediante criterios adicionales –como la separación de materiales metálicos, materiales ligeros aspirables, materiales rodantes como piñas, piedras no angulosas, nueces, etc.–.

Las cribas trabajan generalmente en dos fases, generalmente simultáneas o consecutivas. En la primera fase, se homogeneiza el material mediante movimientos de vibración, rotación, etc. (los movimientos más rápidos y sofisticados se dan en instalaciones fijas) y en la segunda fase se trabaja sobre la manta de materiales, de la que los más finos salen por cribado –los que tienen un tamaño que les permite atravesar una criba de orificios o el espacio graduable entre una serie de rodillos, discos o estrellas, impulsados por la gravedad y/o la fuerza centrífuga–, mientras que los materiales más gruesos son empujados fuera de la unidad de cribado por el propio movimiento, a veces ayudado por la gravedad.

El uso forestal de estas instalaciones está restringido al postratamiento de materiales pretriturados que tienen abundantes impurezas duras –clavos u otros metales, grandes piedras, etc.– que dañarían los órganos de tratamiento de astilladoras e incluso trituradoras. Por ejemplo, los tocones o los materiales de tipo palés reciclados. Por ello, frecuentemente se encuentran en los parques de materia prima de las industrias de trituración. Las diversas salidas de los materiales de distinto tamaño o clase se producen típicamente mediante cintas transportadoras.

No obstante, los equipos remolcados pueden también usarse en cargaderos de monte, requiriendo gran espacio. En España, se han usado en experiencias de tratamiento de tocones tras cortas a hecho, tanto en eucalipto (*Figura 24*) como en chopo (*Figura 25*).



Fig. 24: Juego de pretrituradora y criba.



Fig. 25: Pretrituradora y criba en chopera.

2.2.1. Cribas de tambor

Los tambores o “trommels” son dispositivos cilíndricos huecos y giratorios, a través de los que se hace avanzar el material a cribar, con la ayuda de unos filetes de tornillo situados en la cara interior del propio tambor. Las paredes de dicho cilindro son cribas (de una o varias luces que van aumentando según avanza el material), a través de las que la fuerza centrífuga y, en la parte inferior del tambor, la gravedad, empujan a los materiales suficientemente finos a atravesar la pared del tambor.

Aunque existen cribas de tambor semifijas (y semimóviles), en su mayoría son más bien máquinas de parque de fábrica que de cargadero de monte. Las cribas de tambor se pueden combinar con cribas de estrella o vibratorias, dispuestas antes del *trommel*, para separar materiales demasiado gruesos y conseguir una separación más calibrada. También es característico, en instalaciones fijas, situar después de la cinta por la que salen los gruesos del tambor, nuevos separadores de materiales ligeros –por aire– o de metales, materiales rodantes, etc.

Un esquema del funcionamiento de estos equipos se muestra en la *Figura 26*, en que se aprecia que la alimentación suele ser vertical (con pala o pulpo no integrados) sobre una rejilla de separación de gruesos –que, como se ha indicado, se puede sustituir por otra criba de estrellas o discos– y que lo normal es incorporar un cepillo cilíndrico de limpieza exterior del tambor.

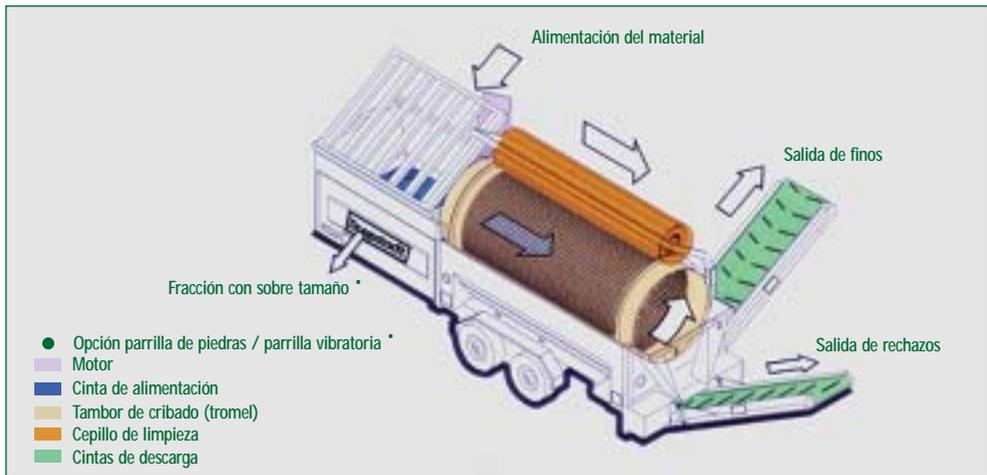


Fig.26: Criba de tambor o trommel(Fuente: Doppstadt, 2006).

2.2.2. Cribas de estrellas o discos

El principio de las cribas planas de estrellas o de discos es el giro paralelo de una serie de rodillos equipados con discos o estrellas perpendiculares al eje de cada rodillo que, al girar, consiguen simultáneamente extender y homogeneizar la manta de materiales, hacerles avanzar perpendicularmente a los ejes de los rodillos, y empujar a la fracción más fina a atravesar el espacio entre rodillos para caer a una cinta transportadora inferior o a una criba más fina.

Maquinaria empleada para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal

Este tipo de cribado es el más utilizado en materiales forestales, especialmente en trabajos en cargadero de monte, por su menor envergadura que los tambores, y porque son de fácil aplicación en serie respecto otras máquinas. Por ejemplo, se puede instalar una de estas cribas planas a la salida de una pretrituradora, encima de la mesa de alimentación de una trituradora, de forma que rechace los materiales gruesos producidos por la primera antes de entrar a la alimentación del tambor de la segunda. Los materiales rechazados podrían así realimentar la pretrituradora y/o pasar a otras líneas de separación de metales, piedras, etc.

En las Figuras 27 y 28 se muestran, respectivamente, una criba de discos estacionaria (de planta) y una doble criba de estrellas. Esta última, al superponer dos cribas planas de estrellas de distinta luz, permite una separación en tres fracciones diferentes (gruesa, media y fina). En la Figura 29 se muestra la instalación de una criba de discos en la mesa de alimentación de una criba de tambor o *trommel*, rechazando antes de entrar al tambor los elementos más gruesos.



Fig. 27: Criba de discos estacionaria.



Fig. 28: esquema de doble criba de estrellas.



Fig. 29: Criba de discos a la entrada de un trommel.

2.2.3. Separadores por aire

Aunque no tienen un uso en cargadero de monte, sí pueden ser de utilidad en una línea industrial de reciclado de residuos de madera u otros reciclajes. Su fundamento es la menor resistencia al soplado o aspiración de los materiales ligeros, especialmente si presentan un elevado cociente entre superficie y volumen (por ejemplo, pedazos de papel). Así, si se dispone un ciclón soplador atacando a una columna de materiales que caen o un ciclón aspirador sobre una manta de materiales, se separarán los materiales más ligeros.

Un ejemplo del funcionamiento de este último tipo de separadores de aire, en que también se aprecia un separador de materiales férricos y otro de piedras –materiales rodantes–, todos ellos simultaneando su acción a la salida de una criba de tambor, se ilustra en la *Figura 30*.



Fig. 30: Separador por aire combinado.

2.3. Máquinas de carga y manipulación de biomasa

2.3.1. Palas cargadoras y cargadoras frontales de horquilla (de ruedas)

Están basadas en máquinas excavadoras, generalmente articuladas y de ruedas, con dos brazos laterales de accionamiento hidráulico, a veces de tipo telescópico, incluso reduciéndose a un solo brazo –en esos casos, se habla de palas de alto volteo–, en cuyo extremo se dispone una cuchara frontal, empleada con frecuencia para movimiento de tierras, pero válida igualmente para el manejo de astillas y otros materiales incoherentes (*Figura 31*). Las palas cargadoras propiamente dichas son máquinas de cargadero, sea de monte o de fábrica, y su principal uso relacionado con la biomasa es la alimentación, sea de camiones, contenedores o de la tolva o mesa de alimentación de trituradoras, pretrituradoras o cribas, cuando no cuentan con grúa propia o forman parte de una cadena. Para el caso de la carga de camiones de alta capacidad –de “piso móvil”, con laterales cerrados y altos–, es necesario que se trate de palas de gran tamaño o de alto volteo.



Fig. 31: Pala cargadora.



Fig. 32: Cuchara especial para biomasa o RSU.

El principal inconveniente de este tipo de palas es su falta de versatilidad (trabajan bien con astillas, pero peor con materiales irregulares, tales como residuos forestales o urbanos) y su relativo alto coste en comparación con otras máquinas alternativas, como los cargadores telescópicos de un solo brazo, de “alto volteo”, que se describen a continuación. Hay que pensar que se trata de máquinas concebidas para el manejo de áridos u otras cargas de alta densidad, por lo que están sobredimensionadas en potencia para lo necesario para la carga de astillas –por ejemplo, una pala Komatsu WA480-6 de entre 4,5 y 5 metros cúbicos de capacidad de cuchara tiene una potencia de 300 CV y un peso en orden de marcha de 25 t–. Para el trabajo con biomasa o astillas, estas máquinas pueden incorporar, sustituyendo a la cuchara frontal, un peine o rastrillo para concentrar residuos, o algunos accesorios para cargar materiales irregulares, como barras compresoras que hacen la función de una pinza, sujetando y comprimiendo la carga, como las que se han desarrollado para residuos sólidos (Figura 32). Para la carga de astillas, también se fabrican cucharas de dos valvas, para evitar que las astillas se caigan y dispersen. Por otro lado, si son necesarios trabajos de mantenimiento o reparación de cargaderos (extender áridos, retirar obstáculo, cavar zanjas de drenaje o reparar cunetas) este tipo de máquina puede hacer una labor mixta de ayuda a la carga y mantenimiento de cargaderos, para lo cual se puede también acoplar aperos simultáneos a la cuchara frontal (por ejemplo, una grúa con cazo de retroexcavadora en la parte trasera, como se muestra en la Figura 33).



Fig. 33: Pala cargadora con grúa de retroexcavadora adicional.

Las cargadoras frontales de horquillas, llamadas “grapas” en el mundo del chopo, son máquinas concebidas para la descarga, manipulación, apilado y carga de madera en parque de fábrica, contando con dos brazos laterales terminados en sendas pinzas, que pueden ser de apertura fija o, con mayor frecuencia, de accionamiento hidráulico. Frecuentemente, la máquina base es la misma que la de las palas cargadoras que se han descrito, aunque dentro de las gamas menos pesadas para su uso forestal en España.

Su mayor importancia, fuera de los parques de fábrica, en el sector forestal español, proviene de su empleo en choperas, donde se usan preferiblemente frente a los tractores forestales, dadas las buenas condiciones de pendiente de las plantaciones, no sólo para mover la madera y apilarla para su posterior carga en camión, sino para labores auxiliares en el apeo con motosierra –para empujar a los chopos, especialmente cuando el apeo en la dirección deseada es problemático, como en la *Figura 34*– y para acumular los residuos de ramas y follaje que tradicionalmente se quemaban después de su amontonado.

Su principal uso relacionado con los aprovechamientos de biomasa consiste en su acondicionamiento, especialmente en choperas, previamente a su astillado. Para ello, se les ha dotado de aperos especiales tipo peine o rastrillo, dado que con las pinzas tradicionales arrastran piedra y tierras en exceso para su uso energético. Un ejemplo de apero –aunque con dos de las púas rotas– se muestra en la *Figura 35*.



Fig. 34: Cargador frontal auxiliando el apeo de un chopo.



Fig. 35: Peine o rastrillo de reunión de restos acoplable a cargador frontal.

46 2.3.2. Cargadoras rotatorias (basadas en retroexcavadora)

Se trata de máquinas que, en España, son frecuentemente de orugas, aunque es perfectamente posible encontrarlas sobre neumáticos. El chasis rota alrededor de un eje vertical, de modo que el maquinista puede mirar de frente al objeto de trabajo, que puede encontrarse alrededor de la máquina en un radio de 360°. Su principal uso se encuentra en la obra pública –apertura de zanjas o pistas, pequeño movimiento de tierras, etc.–, si bien es extensa su utilización en el sector forestal español, tanto como ahoyador en repoblaciones, en su modalidad de retroaraña, como máquina base para cosechadoras empleadas para cortas a hecho en la cornisa cantábrica o para la apertura y reparación de pistas y cargaderos. En relación con la biomasa, su principal utilización se relaciona con la carga de astillas, aunque es frecuente que se sustituya el cazo dentado típico de los trabajos de movimiento de tierras por una pinza de

Maquinaria empleada para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal

tipo pulpo, como se aprecia en las *Figuras 36* y *37*. En estas fotografías, se aprecia el tipo de retroexcavadora más adecuado para la carga, en que la cabina se puede elevar por medio de mecanismos hidráulicos de modo que se encuentra situado por encima del nivel de carga, lo que es adecuado desde el punto de vista operativo y de seguridad y salud.



Fig. 36: Cargadora rotatoria de ruedas, anclada.



Fig. 37: Cargadora rotatoria de cadenas.

Hoy en día, las retroexcavadoras más corrientes tienen la cabina por debajo del nivel de carga, sobre un chasis rotatorio encima del nivel de las orugas o neumáticos, lo que las hace menos adecuadas para la carga, si bien pueden emplearse, al igual que las palas cargadoras y los cargadores telescópicos, para esta función. Hay que recordar también el posible uso mixto para labores de reparación o mantenimiento de cargaderos o pistas. Una de estas retroexcavadoras convencionales se muestra en la *Figura 38*.

2.3.3. Cargadoras de brazo telescópico

Los cargadores telescópicos son máquinas ligeras (las fabricadas por la casa francesa *Manitou*, por ejemplo, oscilan entre 58 y 101 CV, con pesos en vacío entre 5 y 11,5 t), generalmente de ruedas, con un solo brazo frontal, que sale frecuentemente de un lado de la máquina hacia delante y arriba.

Como se ha señalado, se llaman también palas telescópicas de alto volteo.



Fig. 38: Apero de retroexcavadora convencional.



Fig. 39: Cargadora de brazo telescópico alimentando un camión de piso móvil.

La inclinación del brazo se regula por un cilindro hidráulico y su longitud es mayor que la de los brazos de otras máquinas cargadoras, por su carácter telescópico. En el extremo distal del mismo, se acopla un apero que, para su uso como cargador de astillas, puede ser una cuchara cerrada (*Figura 39*), una grúa de tipo pulpo, etc. Su principal función en el sector forestal es la carga de biomasa, especialmente de astillas.

En otras tareas, como las de acopio y acordonado de biomasa, se le pueden acoplar también peines o rastrillos, como el que se muestra en la *Figura 40*. Este tipo de máquinas se está haciendo muy popular para muy distintos usos en que se necesita trabajar en altura para elevaciones o cargas no muy pesadas, dada la polivalencia propiciada por un cambio rápido de aperos ligeros, dados también su peso y potencia moderados que conllevan un coste horario reducido, y dada por fin su pequeña envergadura, si se compara con otro tipo de cargadores, que facilita su transporte.



Fig. 40: Apero para reunión de restos (“rastrillo”) acoplable a una cargadora telescópica.

2.4. Máquinas para la corta de árboles o la recolección de matorral con vistas al aprovechamiento de la biomasa

48

2.4.1. Cosechadoras convencionales y multitaladoras

Las cosechadoras son máquinas que tienen la capacidad de cortar árboles y procesarlos a continuación (es decir, desramarlos, tronzarlos y despuntarlos). Presentan un cabezal de apeo y procesado que cuenta con los siguientes elementos:

- Un útil de corte para el apeo y despunte que es, generalmente, una espada de motosierra que gira alrededor de uno de sus extremos y que está protegida por una funda metálica cuando no está cortando. Aunque hay máquinas de corte mediante cuchilla o cuchillas, lo más común en España para el uso en cortas de madera son los útiles de

corte de cadena, dado que no dañan la madera en el corte, tienen menor requerimiento de potencia –especialmente para diámetros grandes–, así como un mantenimiento más sencillo, aunque también más frecuente, que el de las cuchillas –pero que puede realizarse en el taller y evitar las pérdidas de tiempo llevando juegos adicionales de cadenas–.

El cabezal se aproxima al árbol y lo abraza mediante las garras de desramado y los rodillos de alimentación. En ese momento, se acciona la espada.

Una vez cortado el árbol, la articulación en la base del cabezal le obliga a caer en sentido opuesto a la grúa, lo que se puede propiciar, especialmente si el pie se engancha, si se “tira” con la propia grúa.

En algunos cabezales, hay una “motosierra escamoteable” adicional, que sólo se emplea para el despunte (*Figura 41*), lo que puede ahorrar algo de tiempo y separar más eficazmente la biomasa –punta y ramas– de las trozas, aunque sea a costa de trabajar en un solo lado de la calle, con lo que la madera quedaría a ese mismo lado y las ramas y puntas, al otro.

- Un sistema de alimentación, formado por rodillos, que generalmente son piezas cilíndricas enfrentadas que giran en sentidos contrapuestos, cubiertos por piezas metálicas prominentes (dentados), en ocasiones con filetes espirales cortantes sobre su superficie externa –cuando se pretende descortezar ciertas especies–, otras veces con superficies de goma cubiertas por cadenas análogas a las que se acoplan sobre los neumáticos para mejorar la adherencia. En algunos casos, como en la citada *Figura 41*, los cilindros de alimentación son de tipo cinturón, de sección ovalada, aumentando la superficie de contacto con el árbol. El sistema de alimentación, una vez apeado el árbol, hace que avance con fuerza, atravesando el propio cabezal desde la base a la punta. En



Fig. 41: Cabezal cosechador con motosierra adicional para despunte.

dicho avance, además de producirse el desramado, se ejecutan los cortes de tronzado, bien de forma automática, con control manual del maquinista o con un sistema mixto en que el ordenador sugiere los puntos de tronzado, que son confirmados o no por el maquinista.

En los cabezales más modernos, los cilindros de alimentación son cuatro, todos motrices, en muchos casos con la banda de contacto con los troncos engrosada con respecto a la corona o alma interior, más ligera, que se hace girar por un motor hidráulico independiente para cada cilindro. Es importante que los latiguillos que accionan esos motores no estén expuestos al contacto con el tronco o las ramas, lo que daría lugar a muchas averías.

- Unas garras de desramado, parte de las cuales son cuchillas curvas fijas y forman parte del cuerpo del propio cabezal, abrazando el árbol, en el momento de su apeo, por la zona superior y proximal con respecto al propio cabezal. Las otras dos garras de desramado abrazan al árbol por la zona distal de su sección. Son accionadas mediante cilindros hidráulicos para presionarlas tangencialmente contra la superficie externa del fuste y cortar las ramas, por impacto con sus bordes afilados, cuando del tronco es empujado por el sistema de alimentación desde su coza y hacia la cogolla.

Su forma de trabajar apea, y en su caso procesa, un árbol detrás de otro. Las **cosechadoras convencionales** pueden tener diversos papeles en el aprovechamiento de biomasa:

- Corta y, en su caso, tronza, de árboles pequeños o de especies no comerciales para su saca con autocargador. En este caso, la cosechadora convencional compite con las multitaladoras, y su principal ventaja es que tiene mucha mayor facilidad para tronzar en el caso de que los pies sean de un tamaño que lo exija –para autocargadores convencionales, más de 8 ó 10 m de altura–.
- Procesado en pista o cargadero de árboles completos extraídos por otros medios. En cortas de regeneración, los pies de cierto tamaño se concentran en pista o cargadero por cableo desde pista, por arrastre con *skidder* o con cable aéreo.
- Procesado convencional de la madera separando las copas y ramas para biomasa de la madera, para su desembosque separado, generalmente con autocargador. Este sistema es similar al utilizado cuando se persigue sólo sacar la madera, aunque se producen pérdidas de tiempo cercanas al 20% por la necesidad de apilar de forma separada la biomasa y la madera, fuera de la futura trayectoria de la máquina, para evitar que se contamine la biomasa con barro o tierra. En el caso de cortar sólo para madera, los “restos” se depositan precisamente delante de la máquina para que sean pisados por ella, de modo que se reduce su volumen –lo que es conveniente para reducir riesgos de incendio y facilitar su incorporación al suelo– y para que actúen como un colchón, reduciendo los daños de compactación o formación de rodadas que la propia cosechadora y, sobre todo, el autocargador, pueden producir sobre la superficie de la calle.

Las **multitaladoras** no son cosechadoras, porque no pueden desramar y tronzar los árboles, sino sólo apearlos y apilarlos. Su ciclo de trabajo en la primera aproximación al pie y

su apeo es similar al de las cosechadoras, si bien es posible –y conveniente, dado el tamaño pequeño de los árboles que se cortan para biomasa con destino energético– que corten más de un pie al accionar su útil de corte. Además, el cabezal tiene un doble sistema de garras que no son desramadoras y que sirven para la sujeción de los pies durante su apeo, en el caso de uno de los juegos de garras, y en el caso del otro juego para mantenerlos sujetos al cabezal, agrupados en sentido vertical como un ramillete mientras se produce la aproximación a otro arbolillo o grupo de ellos que, tras su apeo, resultan acumulados con los anteriores. Por este motivo, se conocen estos cabezales como “acumuladores” (*Figuras 42 y 43*).



Fig. 42: Cabezal multitalador.



Fig. 43: Cabezal de guadaña en multitalador ligero.

Aparte del órgano de corte y de el doble juego de garras, el cabezal de estas taladoras-apiladoras acumuladoras no presenta un sistema de alimentación, ni requiere tanta robustez como la necesaria para la labor de desrame. La ausencia del sistema de alimentación permite reducir los requerimientos de caudal hidráulico (y, por ello, de potencia) y además facilita la aproximación del cabezal a los árboles en masas densas o agrupadas en matas, como ocurre con frecuencia en los montes bajos.

Por el interés en que el cabezal apee más de un pie a la vez, el útil de corte suele ser de cuchilla, dado que, por un lado, el pequeño tamaño de los pies y la inexistencia de sistema de alimentación hace menos gravosos los mayores requerimientos de potencia de las cuchillas y, por otro lado y sobre todo, porque los cabezales de sierra de cadena tienen problemas para el ataque a varios árboles a la vez –si la cadena está cortando un tronco y contacta con otro, puede atascarse o rebotar y pararse en medio del corte–. Además, los cabezales de cuchilla son menos sensibles a las piedras, pudiendo trabajarse con más seguridad en condiciones de mala visibilidad desde la máquina, lo que es frecuente cuando se trabaja en montes bajos con agrupación en matas espesas.

En los países escandinavos, las multitaladoras se han impuesto para maderistas que trabajan de forma continua para biomasa, sobre todo en montes bajos jóvenes de abedul. Para este tipo de corta se emplea el cabezal de la *Figura 43*, aunque existen también cabezales basados en sierras de cadena circulares, que se consideran adecuados cuando la densidad de pies a cortar es muy elevada, como en algunos cultivos energético forestales de turnos muy cortos (chopo, mimbre...).

En los Estados Unidos, el sistema de aprovechamiento de árboles completos se emplea con cierta frecuencia para cortas a hecho de madera de cierto tamaño con destino en la industria. Por ello, se han desarrollado muchos cabezales para taladoras-apiladoras de cierto tamaño, como los que fabrica John Deere. Lo más frecuente hoy es que se basen en grandes sierras circulares, como el que se muestra en las *Figuras 44 y 45*. Recientemente, han aparecido en el mercado escandinavo cabezales mixtos, con cadena y guillotina.



Fig. 44: Cabezal multitalador pesado.



Fig. 45: Cabezal multitalador pesado de sierra circular.

2.4.2. Multitaladoras combinadas

La relativa ligereza y baja demanda de potencia de los cabezales multitaladores, junto con la creciente dificultad para encontrar maquinistas en los países nórdicos, ha permitido concebir máquinas, sobre la base de un autocargador potente, que realicen otras funciones sobre los árboles completos. Estas máquinas están en fase de ensayo, aunque algunas casas ofrecen los prototipos ya en su catálogo.

2.4.2.1. Multitaladoras-astilladoras

Existe un prototipo producido por Valmet, que es una astilladora móvil, integrada en autocargador, con carga frontal, que se produce por medio de la propia grúa ligera en cuya punta se dispone el cabezal multitalador (*Figura 46*). La astilladora expulsa la astilla, hacia un depósito trasero, que tiene un ingenioso sistema de descarga, basculando longitudinalmente, sobre un vehículo que puede situarse delante de la propia máquina.

La carga longitudinal, a través de una tolva situada delante de la cabina, y esa posibilidad de descarga sin necesitar que otro vehículo se disponga a su lado, hacen que esta máquina combinada sea especialmente adecuada para cortas parciales en calles no muy anchas, lo que es una ventaja dado que el pequeño tamaño de los árboles hace que su probable origen sea un clareo selectivo, en donde no resulta razonable usar máquinas que requieran mucho espacio.

Su mayor ventaja es ser multifuncional (en montes pequeños, se puede pensar en trabajar con una sola máquina más un juego de contenedores), si bien en cuanto las distancias de desembosque se incrementan, requiere un vehículo auxiliar para la saca de la astilla. Como todas las máquinas multifuncionales, la propia sofisticación le hace vulnerable a las averías,



Fig. 46: Multitaladora - astilladora.

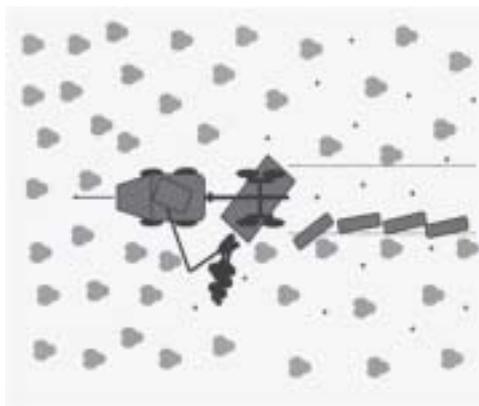


Fig. 47: Esquema de trabajo de una multitaladora – empacadora.

y además una avería en cualquiera de sus órganos de trabajo paralizaría completamente –o casi– todos los procesos.

2.4.2.2. Multitaladoras-empacadoras

De acuerdo con Jylha y Laitila (2007), el prototipo llamado Fixteri se compone de un “harwarder” (máquina combinada entre una cosechadora y un autocargador) como máquina base, en la que el cabezal cosechador se sustituye por un cabezal multitalador de guillotina Naarva-Grip 1500-40E, cuyo diámetro máximo de corte es de 30 cm, mientras que el remolque se sustituye por una unidad empacadora giratoria y semiautomática, de forma que el conjunto funciona de un modo similar a una cosechadora de cabezal talador en punta de grúa y plataforma de procesado.

La escasa potencia de la máquina base, junto con la falta de experiencia del maquinista en las experiencias descritas, conduce a pensar en que las productividades registradas pueden mejorarse ampliamente en prototipos más desarrollados a partir de esta nueva idea de máquina multifuncional. Al igual que en el caso anterior, –parece tener ventaja para su uso en esquemas móviles y calles no muy anchas– la unidad de empacado funciona en dirección casi paralela al eje de la máquina y puede ser alimentada desde ambos lados de la calle (Figura 47).

2.4.3. Cosechadoras – recolectoras de matorral (o de restos acordonados)

Las máquinas cosechadoras de matorral no son muy comunes en el panorama internacional, a pesar de su interés en relación con especies invasoras o con la prevención de incendios. En general, se basan en una desbrozadora remolcada por un tractor, a la que se acoplan uno o dos ciclones que impulsan la mayor parte del material desmenuzado por ésta, a través de una cañonera, hasta un contenedor, remolcado también por el mismo tractor –podría ir en paralelo al mismo–.

Un prototipo sobre esta idea, remolcable por un tractor agrícola adaptado de cierta potencia, y con un contenedor de 12 metros cúbicos aparentes de capacidad, fue desarrollado

por la empresa aragonesa Serrat Trituradoras en la segunda mitad de los años 90, con resultados variables, en general con unos coeficientes de tiempo productivo reducidos (*Figuras 48 y 49*).



Fig. 48: Depósito contenedor de una cosechadora de matorral.



Fig. 49: Apero desbrozador y ciclón de una cosechadora de matorral.

Actualmente, se está desarrollando y probando otro prototipo con dos ciclones, concebido para una mayor anchura de trabajo y para poder trabajar con materiales más gruesos. El diseño del prototipo ha surgido como fruto de la cooperación entre la empresa Serrat y Ramón Mariner, importante empresario del sector de suministro de madera y tratamientos selvícolas de Castilla y León. Se trata de la máquina *Biomass 500*, que puede emplearse también para triturar restos de corta de madera, y que se equipa con un motor independiente al del tractor de más de 400 CV. Su concepción hace pensar que sea complejo su uso en terrenos forestales que no sean llanos, firmes y no excesivamente pedregosos (*Figura 50*).

Otro problema común a estas máquinas se refiere al riesgo de incorporación de piedras y tierra con la biomasa triturada.



Fig. 50: Trituradora de residuos y cosechadora de matorral con dos ciclones.

En otros países, parece haber pocas experiencias con cosechadoras forestales de matorral, fuera de las cosechadoras pensadas para cultivos energéticos, como por ejemplo la Claas Jaguar (que trabaja, como es natural, en terrenos agrícolas, es decir, terrenos llanos labrados y con una geometría de plantación uniforme), o algunos prototipos para trabajar con ciertas especies (como el que desarrolla en la actualidad el Profesor Roisi en la Universidad de Carolina del Norte para triturar el Mezquite tejano, que en su primera versión parece tener el problema consistente en que más del 50% del material queda sobre el terreno).

2.5. Máquinas para agrupar o acordonar la biomasa

Como se ha indicado al hablar de las palas cargadoras, cargadores telescópicos, etc., una de las funciones que estas máquinas pueden realizar es la agrupación de la biomasa en bruto para su posterior recogida y/o elaboración. Se trata de una labor muy necesaria, podría decirse que imprescindible en los casos de astillado o empacado móvil, en que el alto coste de las máquinas que elaboran o compactan la biomasa bruta sugiere rápidamente que es conveniente que se la encuentren concentrada por una máquina más barata. Algunas de las opciones ya se han comentado. Además, otros sistemas ensayados han sido basados en tractores de orugas o ruedas de potencias moderadas, a los que se acopla un rastrillo delantero, análogo a los que se han mostrado para las palas y cargadores telescópicos, o incluso un rastrillo combinado con una pinza para sujetar la biomasa desde arriba y comprimirla ligeramente, como en el sistema diseñado por Trabisa (*Figura 51*).



Fig. 51: Tractor con peine y pinza para acordonar.

En el caso de emplear peines, el utilizar púas largas tiene el riesgo de romperlas con piedras o tocones, y de arrastrar innecesariamente tierra con la biomasa. Por eso, conviene que los dientes sean cortos (o, en caso de ser largos, que estén separados entre sí para poder evitar las rocas o tocones, donde su situación sea fácilmente previsible, como en una chopera), así como que el apero se pueda levantar ligeramente para evitar el arrastre innecesario de tierra.

2.6. Máquinas empacadoras de biomasa

Se trata de máquinas, en su mayoría, escandinavas. La unidad de empacado está montada sobre el semichasis trasero de un autocargador, y comprime el material biomásico incoherente con que le alimenta la grúa (en el caso más generalizado de formar pacas redondas o rotopacas, se trata de un mecanismo giratorio que, simultáneamente a la compresión, abraza la paca con una cuerda de material sintético). Las pacas resultantes, de longitudes comparables a las trozas de “madera larga”, tienen una densidad entre 400 y 500 kg/metro cúbico aparente si están formadas con material verde, y pueden ser manejadas por la misma maquinaria y por los mismos camiones que hoy se están empleando para la madera.

Existen máquinas que no están basadas en autocargador, sino diseñadas directamente sobre una unidad tractora no forestal o como remolque de un camión. Serían, respectivamente, los casos de la empacadora de patente española ForestPack TEC-1 (que, además, tiene un principio de funcionamiento de “pared basculante” completamente distinto a las máquinas escandinavas, y da como resultado unas pacas de sección cuadrangular, atadas con alambre y bastante más densas, del orden de 600 a 700 kg/metro cúbico aparente). Se muestra una fotografía de modelos anteriores de esta máquina en las *Figuras 52 y 53*.



Fig. 52: Empacadora Trabisa sobre autocargador de ruedas.



Fig. 53: Empacadora Trabisa.

La principal diferencia entre las máquinas que existen en el mercado es el carácter semifijo (o semimóvil), es decir, de operación en cargadero, que tienen las máquinas de mayor envergadura, o que son remolcadas por camiones, como el equipo fabricado por la sueca Rogbico (en el caso de la ForestPack, el uso se limita a cargadero o, en caso de entrar en el monte, a terrenos llanos en que la masa remanente deje un espaciamiento muy amplio). En el caso de las máquinas de John Deere y Valmet, al ser máquinas sobre autocargador, tienen carácter móvil. No obstante, el funcionamiento de la unidad empacadora de John Deere (*Figura 54*), que trabaja en sentido perpendicular al eje de la máquina hace que su uso se dificulte en cortas de mejora, dado que requiere calles con una anchura mínima de unos 5 metros. La unidad empacadora de la máquina fabricada por Valmet hace pacas de una sola longitud, pero la disposición de la unidad es longitudinal y la descarga es lateral, con lo que puede trabajar en calles más estrechas (*Figura 55*). Esta máquina resulta, además, más polivalente, dado que se puede separar la unidad empacadora con relativa facilidad de la cabina y el motor del autocargador, pudiendo sustituirse por el remolque habitual.



Fig. 54: Empacadora John Deere.



Fig. 55: Empacadora Valmet.

En todo caso, la utilidad de las empacadoras se centra en un triple ahorro de costes:

- Ahorro de costes de transporte, dado que el material resultante es más denso que la biomasa bruta (unas tres veces más denso).
- Ahorro en materiales específicos para el manejo de biomasa, en costes fijos y en complicaciones logísticas, dado que se pueden usar las mismas máquinas que para la madera (al menos, los mismos autocargadores y camiones).
- Ahorro en costes de manipulación y almacenamiento, debido al menor espacio requerido y las menores complicaciones para el manejo de pacas frente al de biomasa bruta o material triturado o astillado.

Todos estos ahorros tienen que compensar ampliamente los sobrecostes debidos al uso de esta máquina –que, frente a una trituradora o astilladora, no aporta valor añadido a la biomasa, que debe ser astillada posteriormente en todo caso–. Por ello, los principales usuarios de estas tecnologías en Escandinavia son grandes consumidores, que tienen distancias grandes de suministro y que cuentan con centros logísticos que les permiten manejar grandes cantidades de pacas sin problemas, e incluso procesarlas para la separación de diferentes fracciones, etc.

Otro inconveniente de las máquinas nórdicas (que, por cierto, no tiene en tanta medida la española de patente Trabisa), es que deben trabajar con la biomasa en verde para formar adecuadamente las pacas, lo que dota de cierta rigidez a los sistemas productivos.

Muy recientemente, una empresa asturiana llamada Monra Forestal ha desarrollado una empacadora que tiene como principal novedad que corta las pacas mediante cuchillas (guillotina), lo que es ventajoso cuando el material empacado contiene troncos gruesos, piedras o abundante arena. Las cuchillas como mecanismo de corte han sido incorporadas también recientemente a sus empacadoras distribuidas en España por otros fabricantes, como *John Deere*.

2.7. Máquinas para transporte extraviario de residuos forestales o astillas

2.7.1. Tractores con remolque basculante o de descarga trasera forzada

Se trata de tractores para el movimiento de astillas –la biomasa bruta se suele mover mediante autocargadores o tractores no forestales adaptados y equipados con remolque y grúa, dada

la importancia que tiene su apilado— y existen esas dos posibilidades, de descarga mediante basculamiento (generalmente, elevación y basculamiento del contenedor que hace de remolque, como en la *Figura 56*, aunque en ocasiones el basculamiento es hacia la parte traseras, en vez de ser lateral) o mediante un émbolo interno que, de un modo análogo a cómo funciona la descarga en los camiones de piso móvil, empuja la carga de astillas hacia atrás, propiciando su descarga por la trasera del remolque.



Fig. 56: Tractor (astilladora móvil) con remolque basculante.



Fig. 57: Tractor con remolque de descarga trasera forzada.

En el primer caso, la descarga tiene la ventaja de ser más rápida. En el caso de la descarga forzada por la parte trasera, la principal ventaja es que se pueden producir descargas parciales (por ejemplo, si un tractor o camión debe suministrar pequeñas cantidades de astilla a clientes muy pequeños, para aplicaciones térmicas domésticas). Un ejemplo de este tipo de carga en un tractor agrícola adaptado se muestra en la *Figura 57*, donde se debe resaltar la gran capacidad del contenedor, propiciada por el menor peso y mayor sencillez y estabilidad de los mecanismos de descarga en este último caso, frente a la alternativa basculante.

Esta alternativa de descarga, o formas similares, se emplea también en ciertos camiones de “piso móvil” transporte de astilla.

2.7.2. Tractores o autocargadores con remolques ampliables o con remolques compresores

Un ejemplo es el conocido como *Havu-Hukka*, desarrollado en Finlandia por *Vapo OY Energy*, que permite, de acuerdo con algunos autores, duplicar a capacidad de carga de los autocargadores, llegando a las 10 t en verde. También se utiliza para transporte por carretera, es decir, en remolques de camiones para biomasa bruta. A pesar de la indudable mejora que este aumento de capacidad proporciona, parece que no se ha extendido mucho más este tipo de remolque, por su falta de flexibilidad (dado que no sirve para madera). Se muestra este tipo de remolque en la *Figura 60*, mientras que en la *Figura 59* se muestra el remolque que fabrica *Allan Bruks*. Recientemente, han incorporado este tipo de remolques compresores en sus remolques los principales fabricantes de autocargadores forestales nórdicos.



Fig. 59 y 60: Remolques compresores ABAB y Havu-Hukk.

Otros fabricantes han optado por sistemas más flexibles, como el remolque con teleros que pueden ampliar la anchura de carga hasta 1,4 m, como los que Valmet, Valtra y, más recientemente, otros fabricantes, montan en sus autocargadores o tractores con remolque, de forma opcional. Este sistema se puede emplear también, en cortas a hecho y terreno suave, para ampliar la capacidad de carga de madera (Figuras 61 y 62).



Fig. 61: Remolque de teleros extensibles en autocargador Valmet.



Fig. 62: Remolque extensible en tractor Valtra.

2.8. Camiones de gran capacidad, para biomasa, pacas y/o astillas

En cuanto a los camiones para transporte de biomasa bruta, astillas o pacas de biomasa, su uso está condicionado por la distinta densidad y coherencia de los materiales. En los dos primeros casos, las cajas, remolques o contenedores deben tener paredes cerradas, mientras que los transportes de madera con barras o “teleros” laterales sólo son válidos para las pacas. Las longitudes y pesos máximos autorizados según la legislación española se ilustran en la *Tabla II*.

Los camiones que transportan astillas se ven condicionados por la escasa densidad de este material –en verde, aproximadamente la mitad que la madera, por metro cúbico aparente–. Es por ello que normalmente interesa maximizar el volumen de carga de los camiones de astilla, dentro de los límites que marca la actual reglamentación de tráfico. El camión ideal,

TIPO DE VEHÍCULO		PMA (T.)	PMAC (T.)	LONGITUD (m)
RÍGIDO	2 EJES	18		12
	3 EJES	25/26 (*)		12
	4 EJES	31/32 (*)		12
ARTICULADO	Hasta 4 EJES		36/38 (*)	16,5
	Más 4 EJES		40	16,5
TREN DE CARRETERA	Hasta 4 EJES		36	18,75
	Más de 4 EJES		40	18,75

* Siglas: * PMA: Peso máximo autorizado. (PMAC: idem en circulación. Sustituye al PMA en articulados y con tren de carretera). * Tara: Peso en vacío. * CU: Carga útil. CU = PMA - Tara; CU del conjunto = PMAC - Tara.

Tabla II: Dimensiones y pesos máximos de transporte en España.

dentro del mercado español actual, es un “piso móvil”, cerrado y de 85 a 90 metros cúbicos aparentes de capacidad. Con astilla verde, en función de la especie, este tipo de camión puede llegar a ir sobrecargado, a pesar de que es corriente que se carroce en aluminio (por ejemplo, un camión de piso móvil de 90 m³ de capacidad, con astilla verde de rebollo de 400 kg/metro cúbico aparente, cargaría 36 t, lo que implicaría sobrepeso incluso si fuera un vehículo de más de cuatro ejes). Otra posibilidad que permite un volumen amplio, pero que además mejora la movilidad por estar articulado cerca del centro, sería un camión con remolque o tren de carretera. En todo caso, los camiones de astilla no suelen llevar grúa, sino que son cargados con pala por un medio auxiliar, tal como los que se han estudiado.

Los problemas que presentan este tipo de camiones semi-remolques o con remolque son los debidos a su envergadura, que dificulta su movilidad en monte, sobre todo para los semi-remolques o *trailers* de un solo eje tractor –su capacidad se restringe a pistas de media a buena calidad, preferiblemente en tiempo seco–. No obstante, hay diversidad regional, y la disposición a acceder a terrenos de peores condiciones depende también de la experiencia del transportista, siendo mayor en transportistas que se dedican habitualmente a la madera. Por ejemplo, en Galicia los camiones semi-remolques entran por pistas hasta montes verdaderamente complicados, especialmente si se dedican habitualmente a la madera, mientras que en el País Vasco es común emplear camiones de tres ejes y doble tracción para entrar al monte, e incorporarles un remolque adicional para el transporte por carretera.

También se debe resaltar que los camiones de mayor capacidad necesitan espacio de cargadero y que, como se ha indicado, no suelen tener medios de carga propios, por lo que suelen requerir de un medio auxiliar de carga –pala cargadora de alto volteo o cargador telescópico ligero–.

En el caso de los pisos móviles, lo normal es que descarguen mediante el movimiento alternativo de las láminas longitudinales que forman su “piso móvil”, combinando este sistema, a veces, con el movimiento longitudinal de un septo rígido o de lona, que se desplaza sobre unas guías superiores, lentamente, y empuja la carga de forma progresiva hacia la trasera, que tiene una o dos puertas abatibles y por donde se produce la descarga. Este procedimiento tiene el inconveniente de llevar cierto tiempo –más de diez y, en ocasiones, de 15 minutos por descarga–. Por lo que existen diseños de descarga lateral basculante, como el que se muestra en las *Figuras 63 y 64*.



Fig. 63: Camión sueco de astilla con descarga lateral.



Fig. 64: Remolque de camión de astilla con otro tipo de descarga lateral.

En el caso de la biomasa bruta, lo lógico, dada su poca densidad, es utilizar para su transporte camiones con remolque, en Finlandia se han empleado incluso camiones con mecanismos compresores tipo “Havu-Hukka” (véase el apartado de autocargadores). En los países nórdicos, además, emplean camiones con remolque de gran tamaño, incluida una parte telescópica en el remolque, lo que permite llegar a volúmenes de carga de 145 metros cúbicos aparentes, como el que se muestra en la *Figura 65*, tomada de Ranta y Rinne, 2006 (por supuesto, con dimensiones que exceden las permitidas en España).



Fig. 65: Camión finlandés con remolque telescópico.

Lo mismo ocurre con ciertos contenedores de astillas montados en camiones con remolque y que transportan también la propia astilladora y una grúa, de forma que pueden ir recolectando materiales de diversas fuentes –por ejemplo, siguiendo rutas prefijadas para recolectar material en jardines urbanos y periurbanos–, astillarlos y transportar la astilla, en dos contenedores totalizando 90 metros cúbicos (*Figuras 66 y 67*). Es otro ejemplo de solución tecnológica imposible en nuestro país por la tantas veces criticada rigidez de la legislación española en el transporte.



Fig. 66: camión sueco con remolque y astilladora integrada.



Fig. 67: Grúa y Alimentación de una astilladora integrada en camión.

Lo que sí es posible, como se ha indicado, es la utilización de camiones con remolque para el transporte de astilla, en que se puede alcanzar ese volumen de carga o volúmenes ligeramente superiores, pero sin llevar astilladora ni grúa.

2.8.1. Camiones “multilift” de contenedores, con remolque

Los camiones de contenedores tienen como principales ventajas que facilitan la carga directa de astillas desde la astilladora, evitando que se arroje la astilla en el suelo o que se tenga que depender de la llegada a tiempo de una rueda de camiones, lo que dificulta mucho la logística, y que, cuando se trabaja con astilladoras móviles o con un vehículo que extrae las astillas en un remolque basculante, se puede ahorrar espacio de cargadero. De hecho, si los camiones y los propios contenedores permiten la carga lateral (como el que se muestra en la *Figura 68*), no se necesita más que un tramo de pista con un sobrecancho de 3,5 a 4 metros.

Los contenedores presentes en el mercado tienen unas dimensiones reducidas (entre 35 y 45 metros cúbicos aparentes), por lo que tiene interés su transporte en camiones con remolque. Incluso se estima que se podría, en lugares complicados de acceso, emplear camiones de doble tracción que saquen los contenedores de uno en uno por pistas o carreteras lo-



Fig. 68: Contenedor de carga lateral.



Fig. 69: Camión de contenedores con remolque y grúa.



Fig. 70: Camión con remolque de contenedores.



Fig. 71: Problemas en la carga de contenedores en tiempo húmedo.



Fig. 72: Sistema longitudinal de carga de contenedores en camión "multilift".

cales y posteriormente los enganchen en cargadero de carretera para su transporte. En las Figuras 69 y 70 se muestran camiones de contenedores con remolque, unos de los medios más empleados para el transporte de astillas en los países nórdicos.

No obstante lo dicho, los problemas de carga de los contenedores pueden deberse al propio peso de la carga, que hace que se claven en el suelo cuando éste está húmedo. Es por eso por lo que se recomienda planificar la gestión de los cargaderos teniendo en cuenta este riesgo, si se va a trabajar en tiempo húmedo. En las fotografías de las Figuras 71 y 72, se muestra el proceso más habitual de carga longitudinal de un contenedor, mediante el cilindro hidráulico con que cuenta el camión *multilift*, y un ejemplo de dificultades en la carga de contenedores en tiempo húmedo.

Los problemas del uso de contenedores siguen siendo, en general, de carácter logístico, relacionados con la gran productividad de las astilladoras, especialmente trabajando en fijo, en cargadero. Aunque se eviten problemas de coordinación con los camiones, se seguirá teniendo necesidad de contar con un número suficiente de contenedores y evacuarlos de una forma eficiente, a la vez que van siendo sustituidos por nuevas unidades, lo que, aunque se tenga un margen mayor para la llegada de los camiones, no evita la necesidad de una logística ajustada.

IMPACTOS NEGATIVOS POTENCIALES DE LA EXTRACCIÓN DE BIOMASA FORESTAL

3.1. Pérdida de nutrientes y reducción del crecimiento

La mayor parte de los nutrientes se concentra en hojas, ramillos finos y corteza. Según Hakkila y Fredrikson (1996), en pinares jóvenes un 60% del nitrógeno, fósforo y potasio en la parte aérea se encuentran en la copa. Por ello, la extracción de árboles completos frente a la sola saca de la madera –o el aprovechamiento de los restos de ramas, ramillos y hojas en verde después de la extracción de las trozas maderables–, a pesar de sólo suponer una ganancia de entre un 15 y un 35% en peso extraído, puede hacer multiplicarse por entre 1,5 y 2 la exportación de calcio, magnesio y sodio (Nisbet *et al.*, 1997), pudiendo llegar a ser entre dos y tres veces mayores a las sufridas en el aprovechamiento maderero tradicional las pérdidas de nitrógeno y fósforo. Autores escandinavos señalan un incremento en las exportaciones de nitrógeno, calcio y magnesio de entre un 67 y un 78% en el caso de aprovechamientos por el sistema de árboles completos frente a los sistemas tradicionales en que sólo se extrae madera y corteza (Alakangas *et al.*, 1999).

De acuerdo con Cacot *et al.*, (2004), el calcio es el elemento, debido a los balances minerales, más susceptible de resultar deficitario después de una intensificación de las extracciones. Otros elementos con riesgo destacado de déficit en los suelos franceses estudiados son el fósforo y el nitrógeno. Sin embargo, de acuerdo con los mismos autores, desde el punto de vista del balance global de carbono, la retirada de restos con fines energéticos es preferible a su abandono sobre el terreno, mientras que desde el punto de vista energético, se considera que la inversión total de energía es sólo un 3% de la producida (Hakkila, 2004; Björheden, 2009).

En cualquier caso, desde el punto de vista de la nutrición vegetal, y especialmente en suelos sensibles, es conveniente dejar algo de biomasa sobre el terreno. En cortas “a hecho” es difícil una recolección eficaz de más del 70% de la biomasa residual, además es más difícil recuperar lo más fino. De forma natural, parte de ello queda en los suelos. En claros no comerciales (o en cortas finales en que se usa también el sistema de árboles completos) las tasas de extracción de la biomasa son mucho mayores.

Por este motivo, en términos generales se recomienda dejar secar la biomasa –o, en el caso de especies de hoja caediza, hacer los aprovechamientos en invierno– con lo que la mayor parte de las hojas y parte de los ramillos quedarán en el terreno, incluso si se emplea el sistema de árboles completos. El inconveniente de dejar secar la biomasa es que las ramas se vuelven quebradizas, lo que dificulta su recogida mecanizada. A cambio, la astilla más seca gana en poder calorífico y la ausencia de hojas mejora la calidad –menor presencia de álcalis y cenizas–.

Por supuesto, el efecto potencialmente negativo de la extracción de nutrientes depende de varios factores, siendo los más importantes los siguientes:

- La extracción será mayor si lo es la intensidad de la selvicultura –que incluye el peso de las intervenciones y su frecuencia–, es decir que el riesgo será mayor en plantaciones tratadas a turno corto y en que se hagan cortas “a hecho”.
- Los efectos de la reducción de nutrientes dependerán de la edad y necesidades nutritivas de la propia masa forestal –máximas cuando es joven y tiene una mayor tasa de crecimiento–.
- Los efectos dependerán de la sensibilidad de los suelos –de la que se tratará a continuación–.
- Hay también algunos factores climáticos, entre los que destacan los que afectan a la dificultad de liberación de nutrientes o a la facilidad para su lavado –esto es, temperaturas frías y climas lluviosos–.

En cuanto a la sensibilidad de los suelos, el impacto potencial sería mayor en suelos pobres, donde una gran parte de la reserva de nutrientes se encuentra en los propios árboles. Si a esto se une el efecto pernicioso de compactación producida por la maquinaria pesada se podría hablar de suelos susceptibles como son los arenosos y margosos en zonas de alta precipitación, los suelos húmedos con alto contenido en arcillas y los suelos pobres (litorales, muy ácidos, etc.), de acuerdo con Worrell y Hampson (1997).

De forma coherente con estos criterios, Paré *et al.* (1999) indican que “sobre suelos arcillosos, la remoción completa de la vegetación parece sostenible excepto para masas de chopos de alta densidad... El análisis global de la dinámica de mineralización del nitrógeno muestra que los suelos ricos son más flexibles que los suelos ácidos de texturas gruesas en su capacidad de aporte de nitrógeno”.

De un modo más pormenorizado, y separando la compactación del análisis, es decir, citándose al riesgo de pérdida de nutrientes, Cacot *et al* (2006) consideran tres niveles de sensibilidad, a saber:

- **Suelos muy sensibles:** suelos ácidos con humus en forma de Mor, dismóder o móder. Tienen $\text{pH} < 4,5$ en el horizonte A, con texturas gruesas o medias (arenosos, arenoso-limosos), se forman sobre rocas silíceas pobres –cuarcitas, areniscas silíceas, gneises o granitos claros– o sobre aluviones, coluvios, limos o alteritas de rocas arcillosas calcáreas. Estas circunstancias dan suelos grisáceos o amarillentos, a menudo bajo capas orgánicas de restos fragmentados espesas y más o menos continuas, bajo las que existe frecuentemente también una capa orgánica humificada continua - fibrosa o fina y negruzca - o a veces discontinua. Bajo las capas orgánicas, con una transición abrupta o gradual, aparece el horizonte A. Estos suelos se ponen de manifiesto por la presencia de flora indicadora, de carácter acidófilo estricto, como por ejemplo calluna, arándano, *Leucobrium glaucum*, *Ulex minor*, *Carex pilulifera*, *Deschampsia flexuosa*, *Melampyrum pratense* o *Dicranum scoparium*.

En estos suelos **sólo se podría extraer biomasa, tras dejar secar los restos entre 4 y**

6 meses, si se fertiliza a continuación empleando una cantidad equivalente a una vez y media la cantidad de minerales extraídos.

- **Suelos medianamente sensibles:** Suelos menos ácidos con humus de tipo Mull-móder o dismull. Tienen el pH del horizonte A entre 4,5 y 5, pudiendo presentar todas las texturas, si bien son más frecuentes en texturas arenosas o limosas. Se forman sobre depósitos originados a partir de rocas silíceas –en este caso, se encuentran en laderas o al pie de las mismas–, o bien sobre aluviones, coluvios, limos o alteritas de rocas arcillosas calcáreas, o finalmente sobre rocas arcillosas con dominancia de caolinita. En todo caso, son suelos ácidos o descarbonatados, con horizonte A amarillento, pardo-amarillento o pardo claro. Son plantas indicadoras las acidófilas de mayor amplitud, tales como acebo, tojo o árgoma, helecho común –*Pteridium aquilinum*–, *Mespilus germanica* o *Polytrichum formosum*, o las acidófilas de mull oligotrófo, como zarzamora, *Luzula pilosa* y *forsteri*, *Oxalis acetosella*, *Moehringia trinervia* y *Atrichum undulatum*.

En estos suelos, **se recomienda extraer biomasa, tras dejar secar los restos entre 4 y 6 meses, sólo una vez a lo largo de la vida de las masas de coníferas (o en un plazo igual a su edad de madurez en masas naturales), y espaciar las intervenciones sobre montes bajos o medios en que se extraigan ramas y copas un mínimo de 30 años.** En caso de intervenir con una frecuencia mayor, se haría necesario fertilizar.

- **Suelos poco sensibles:** Suelos neutros o básicos con humus de tipo Mull mesotrófico, mull eutrófico, mull cálcico o mull carbonatado. Tiene el pH del horizonte A entre 5,5 y más de 7. Salvo los suelos netamente básicos, sobre rocas calcáreas, son suelos con capa orgánica de hojas o acículas sin descomponer discontinua o ausente, constituida únicamente por hojas o acículas del año. Los suelos menos básicos pueden presentar la flora acidófila de gran amplitud más común junto con flora neutrófila, los demás presentan flora neutrófila (*Crataegus laevigata* u *oxycantha*, *Rosa arvensis*, *Poa nemoralis*, *Polygonatum multiflorum*), neutrocalcícola (*Acer campestre*, *Ligustrum vulgare*, *Euonymus europaeus*, *Cornus sanguinea*, *Brachypodium sylvaticum*) y/o calcícola estricta (*Rosa canina*, *Lonicera xylosteum*, *Viburnum lantana*, *Mercurialis perennis* y *Heleborus foetidus*, por ejemplo).

En los suelos menos sensibles, **se recomienda extraer la biomasa dos veces a lo largo de la vida de las masas de coníferas (o dos veces en un plazo igual a su edad de madurez en masas naturales), y espaciar las intervenciones en que se extraigan ramas sobre montes bajos o medios un mínimo de 15 a 20 años.** En caso de intervenir con una frecuencia mayor, se haría necesario fertilizar. En todo caso, se recomienda también dejar secar los restos entre 4 y 6 meses antes de su recogida.

3.2. Efectos indirectos de la retirada de ramas y follaje

Además de lo indicado, la extracción de biomasa puede causar efectos indirectos sobre el

crecimiento y las condiciones ecológicas de las masas forestales. Puede cambiar el microclima, reduciéndose la humedad y elevándose las temperaturas, y se puede producir una acidificación edáfica.

De acuerdo con Cacot *et al.* (2006), la extracción de restos, especialmente en el caso de aprovecharse una proporción elevada de los árboles por el sistema de árboles completos, puede provocar acidificación por la retirada de una parte significativa de los cationes alcalinos o “básicos” (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) contenidos en las ramas y el follaje. Algunos autores han valorado la reducción del pH en 0,1 puntos en el caso de cortas finales (Savolainen y Berggren, 2000).

Aunque a la extracción de nutrientes y pérdida de fertilidad debida a la recogida de biomasa se le atribuya el descenso en el crecimiento subsiguiente de la población remanente –en masas de abeto rojo, se ha valorado la pérdida de crecimiento en un 10% aproximadamente, según Kukkola y Mälkönen (1997)–, así como reducciones en el vigor y crecimiento de la regeneración natural o de la posible repoblación establecida a continuación, hay una gran dispersión de resultados en los estudios realizados. En muchos casos, se aprecia una disminución del crecimiento, especialmente de la regeneración o de poblaciones jóvenes, después de la extracción de árboles completos o restos de corta, en comparación con los aprovechamientos tradicionales en que estos restos quedan en el suelo, pero este descenso del crecimiento se atribuye con mayor frecuencia a la competencia por parte de vegetación arbustiva que nace o rebrota en ausencia de los impedimentos que supone una capa de restos más o menos gruesa (por ejemplo, en Cox y Van Lear, 1985; Mann *et al.*, 1988, y Proe y Dutch, 1994). Esta germinación y/o rebrote de vegetación espontánea a veces hace reducirse el nivel de nutrientes disponible en el suelo porque son demandados por las nuevas plantas, de tal manera que tras retirar la biomasa residual, el rebrote o germinación de esta vegetación acompañante hace que la biomasa aérea alcance un máximo.

En la península ibérica, las experiencias relacionadas con la influencia de la extracción de residuos sobre la productividad posterior de las masas forestales se limitan a un estudio realizado en dos zonas de *Eucalyptus globulus* en Galicia y Asturias, y otras dos zonas del centro de Portugal (Jones *et al.*, 1999). En este trabajo se tomaron datos de crecimientos y descomposición de residuos durante tres años tras el primer aprovechamiento y posterior replantación o brotación de cepa.

En definitiva, los resultados sugirieron que, en general, el mantenimiento de los residuos en el suelo tras el aprovechamiento induce un mayor crecimiento de la nueva masa, al menos en los primeros años, que si estos son extraídos del monte, siendo más marcado el efecto cuando los restos son incorporados al suelo. Los autores propusieron dos causas para explicar este aumento del crecimiento:

- Una tasa de liberación de nutrientes más rápida.
- Una mejora en el régimen de humedad del suelo por la incorporación de residuos.

En cuanto a la erosión, de acuerdo con pruebas realizadas en Galicia, si se aprovechan sólo las ramas (dejando ramillos y acículas) la tasa de erosión es siempre muy baja (Balboa *et al.*, 2005). No obstante, la erosión está muy relacionada con la pendiente, y tanto la conveniencia de mecanizar la recolección de biomasa, como la posible necesidad de fertilización, aconsejarían evitar las pendientes elevadas.

En cualquier caso, estos estudios requieren plazos largos, especialmente bajo climas fríos, en que la liberación de los nutrientes puede ser muy lenta, demorando la manifestación de los efectos del aprovechamiento. Por ejemplo, la liberación de nitrógeno o fósforo desde las ramas al suelo puede comenzar sólo una década tras la corta, según Kalio y Leinonen (2005).

Otro efecto indirecto, en este caso positivo, es un incremento en la presencia de regeneración natural tras la retirada de restos, frente a su abandono sobre el terreno, por el impedimento físico que suponen al éxito de la germinación o el rebrote. No obstante, el tratamiento óptimo al respecto es el triturado de restos con desbrozadora (Balboa *et al.*, 2005).

Hay algunos autores que citan efectos negativos sobre la regeneración por pérdida de la acción protectora que la capa de residuos puede suponer frente a las oscilaciones térmicas y frente a los herbívoros. Estos efectos sobre el microclima, junto con la reducción del aporte de materia orgánica, pueden conducir a un empobrecimiento de la microfauna edáfica, según Cacot *et al.* (2006).

También se valora negativamente el efecto de la extracción sobre la fauna que utiliza la acumulación de restos como refugio o sobre las bacterias, hongos o insectos que la utilizan como parte de su cadena trófica, como los organismos descomponedores saprófitos.

Por último, los residuos pueden jugar un papel protector del suelo frente a la compactación y la formación de rodadas, especialmente en suelos finos y/o en tiempo lluvioso en que los suelos están empapados.

Frente a los potenciales efectos negativos relacionados con la fauna o los nutrientes, se considera muy positivo el efecto de la retirada de restos sobre el riesgo de incendios forestales.

3.3. Medidas preventivas y correctoras

Siguiendo de nuevo a Cacot *et al.* (2004), las siguientes medidas son las más significativas para reducir los efectos negativos de la extracción de restos:

- Dejar secar los restos varios meses antes de su recogida. Ello puede reducir las pérdidas de nutrientes entre un 3 y un 45%.
- Recoger los restos o árboles de especies frondosas de hoja caediza en invierno.
- No recolectar adicionalmente los arbustos y vegetación acompañante
- Limitar, en función de las características del suelo, el número de recolecciones de restos a los largo de la vida de la masa.

Cabría añadir que se deben cumplir todas las normas destinadas a reducir la erosión y la compactación y formación de rodadas, esto podría llevar a reducir o proscribir la recolección de restos en áreas erosionables para pendientes elevadas –según algunos autores, como Balboa *et al.* (2005), por encima del 20 ó 25%, coincidiendo con las pendientes límites de la posible mecanización de la fertilización correctora–.

Ello podría conducir también a no efectuar operaciones de recolección de restos con el suelo encharcado o muy húmedo, especialmente si su textura es fina, dado que en esas condiciones es más importante el papel protector que los residuos pueden jugar sobre las calles de desembosque, actuando como un colchón frente a los neumáticos de los tractores.

La principal medida correctora es la fertilización, las siguientes dosis son las recomendadas por Cacot *et al* (2006):

a) para suelos medianamente sensibles:

- Sobre resinosas (excepto *Picea abies*), si se extraen los restos más de dos veces a lo largo del turno o edad de madurez, se recomienda una dosis por hectárea de 50 kg de N, 60 kg de P₂O₅, 80 kg de K₂O, 90 kg de CaO y 20 kg de MgO.
- Sobre montes bajos de frondosas, si se extraen los restos con una frecuencia inferior a 30 años, se recomienda una dosis por hectárea de 70 kg de N, 10 kg de P₂O₅, 40 kg de K₂O, 270 kg de CaO y 50 kg de MgO. Se recomiendan fertilizaciones adicionales de establecimiento si se repuebla a continuación de la extracción de los restos. En caso de montes medios se recomienda el mismo régimen que para montes bajos, pero en caso de conversión a monte alto, se recomienda una dosis por hectárea de 40 kg de N, 10 kg de P₂O₅, 20 kg de K₂O, 50 kg de CaO y 10 kg de MgO.
- Sobre montes altos de frondosas, si se extraen los restos más de una vez a lo largo del turno o edad de madurez, se recomienda una dosis por hectárea de 40 kg de N, 10 kg de P₂O₅, 20 kg de K₂O, 50 kg de CaO y 10 kg de MgO.

b) para suelos altamente sensibles:

- Sobre resinosas (excepto *Picea abies* y *Pseudotsuga Menziesii*), si se extraen los restos se recomienda una dosis por hectárea de 70 kg de N, 20 kg de P₂O₅, 120 kg de K₂O, 120 kg de CaO y 10 kg de MgO.
- Sobre montes bajos de frondosas, si se extraen los restos se recomienda una dosis por hectárea de 110 kg de N, 10 kg de P₂O₅, 60 kg de K₂O, 410 kg de CaO y 80 kg de MgO. Se recomiendan fertilizaciones adicionales de establecimiento si se repuebla a continuación de la extracción de los restos. En caso de montes medios se recomienda el mismo régimen que para montes bajos, pero en caso de conversión a monte alto, si se recolectan los restos se recomienda una dosis por hectárea de 70 kg de N, 10 kg de P₂O₅, 30 kg de K₂O, 80 kg de CaO y 10 kg de MgO.
- Sobre montes altos de frondosas, si se extraen los restos se recomienda una dosis por hectárea de 70 kg de N, 10 kg de P₂O₅, 30 kg de K₂O, 80 kg de CaO y 10 kg de MgO.

El coste de fertilización utilizando las cenizas de la propia combustión como fertilizante, cuya cantidad en Galicia se estima en unos 10 t de ceniza/ha, se evalúa, dependiendo de la distancia al lugar de procedencia de la ceniza, el acceso al lugar de aplicación y su fisiografía, entre 100 a 200 €/ha (Balboa *et al*, 2005).

En los países nórdicos, hay una larga tradición de aplicación de las cenizas de combustión de las propias calderas de biomasa y de subproductos de la fabricación de pasta de celulosa para compensar las pérdidas de nutrientes, si bien se considera que es una práctica que ha retrocedido bastante en la última década, junto con otros tipos de fertilización (Kalio &

Leinonen, 2005). De acuerdo con Emilsson (2006), su uso fundamental es la revitalización de turberas, aunque en el seno del proyecto internacional del programa LIFE llamado “RecAsh”, se recomienda su utilización mucho más amplia y se proporcionan referencias sobre las cantidades límite y las dosis recomendadas para las distintas especies. Como ejemplo, se recomiendan dosis bastante inferiores a las ensayadas en Galicia, entre 1 y 3 toneladas/hectárea (Kalio y Leinonen, 2005), para prevenir los efectos negativos –liberación y pérdida de nitrógeno en forma de nitratos– cuando el incremento de pH en el suelo es demasiado alto. Según Emilsson (2006), las dosis recomendadas en función de la pobreza del suelo y la especie oscilan entre 0,7 y 2 toneladas de materia seca por hectárea durante cada turno, aunque las cantidades normalmente aplicadas en Finlandia son de 3 a 5 t/ha (y 1 a 3 más si se trata de turberas). Se suele aplicar, en caso de cortas a hecho, entre 5 y 8 años después de la corta, para evitar la pérdida de nitrógeno con el suelo desnudo (además, la preparación de la ceniza en granulada o peletizado hace que la liberación de sus nutrientes sea gradual).

En Finlandia se producen 100.000 t de cenizas de biomasa al año. Se estima que una tonelada de ceniza aporta el equivalente poder enmendante de 150 a 450 kg de calcio, dependiendo de su origen.

El contenido en cenizas de la madera es bajo si se compara con otros combustibles sólidos. El punto de fusión es tan alto que apenas aparecen escorias. La principal excepción es la madera de tocón y raíz con sus abundantes componentes telúricos.

El contenido en ceniza de la madera descortezada de pequeña dimensión es sólo del 0,5%. El contenido en ceniza de la corteza es del 3%, es decir, seis veces el de la madera.

El contenido de ceniza pura en las astillas procedentes de árboles enteros de pequeño diámetro oscila del 0,9 al 1,6% según la especie, con las ramas y hojas incluidas. El contenido de ceniza de las astillas procedentes de troncos desramados es de 0,7-1,0 %.

A partir de los datos de Hakkila & Kalaja (1983) sobre el estudio de cuatro especies importantes finlandesas, aliso, pino, abeto y abedul, puede observarse que, según las especies y el grado de desramado, se obtienen entre 3 y 5 kg de ceniza pura a partir de un metro cúbico comprimido de astillas para combustible. En el siguiente cuadro (*Tabla III*) aparecen los datos de cantidad de ceniza pura por metro cúbico de madera de pequeña dimensión (datos estimados sobre muestras recién cortadas).

Tipo	Abedul	Aliso	Pino	Abeto
	Ceniza (kg/m ³)			
Árboles desramados	3,1	3,3	2,7	3,9
Árboles enteros sin hojas	3,7	4,0	3,0	4,9
Árboles enteros con hojas	4,6	4,6	3,2	6,1

Tabla III: Cantidad de ceniza pura en árboles de pequeña dimensión.

Como la arena y el carbón vegetal se mantienen como impurezas entre la ceniza pura, la cantidad de residuos de ceniza que produce una central es algo mayor.

Las propiedades de la ceniza de las centrales dependen del combustible, del tipo de hogar y de los aparatos de control y separación de la ceniza. Si, por ejemplo, se necesita usar aire a alta presión en la combustión, el contenido en carbón de la ceniza aumenta.

Como la ceniza contiene una gran variedad de nutrientes y elementos muy útiles para los árboles, debe ser reciclada. La ceniza pierde el nitrógeno, que se evapora a la atmósfera durante la combustión, pero contiene abundante fósforo, potasio, calcio y otros elementos. Así, la ceniza de las centrales puede usarse como agente de mejora del suelo y fertilizante, especialmente para suelos con alta acidez y bajo nivel de elementos, con la excepción del nitrógeno. En caso de que la deposición atmosférica no compense el déficit, habrá que abonar con nitrógeno, pero de forma separada de las cenizas, dado que su administración conjunta interfiere y no es eficaz.

La ceniza puede, por tanto, jugar un doble papel. Por un lado, actuar como neutralizador, y por otro disminuir el peligro de desequilibrio del balance de nutrientes del suelo forestal.

De las experiencias existentes en este campo, pueden deducirse algunos puntos de interés (González, 1987):

- Las cenizas de madera y corteza deben mantenerse separadas de las cenizas de combustibles fósiles. Esta última no tiene valor como agente de mejora del suelo y fertilizante y contiene además metales pesados dañinos.
- La ceniza debe estar lo más quemada posible por razones económicas.
- Debe almacenarse de tal modo que sea fácil de cargar y no levante mucho polvo.
- Las condiciones invernales hacen recomendable que se enfríe la ceniza con la menor cantidad de agua posible ya que con humedades superiores al 30%, el diseminado de la ceniza se hace difícil.
- Los finlandeses han tenido algunos problemas de incendios forestales ocasionados por las altas temperaturas de las cenizas al ser cargadas en el vehículo que las disemina. Parece aconsejable no manipular las cenizas cuando están muy calientes.

Las técnicas más empleadas para esta aplicación son las siguientes:

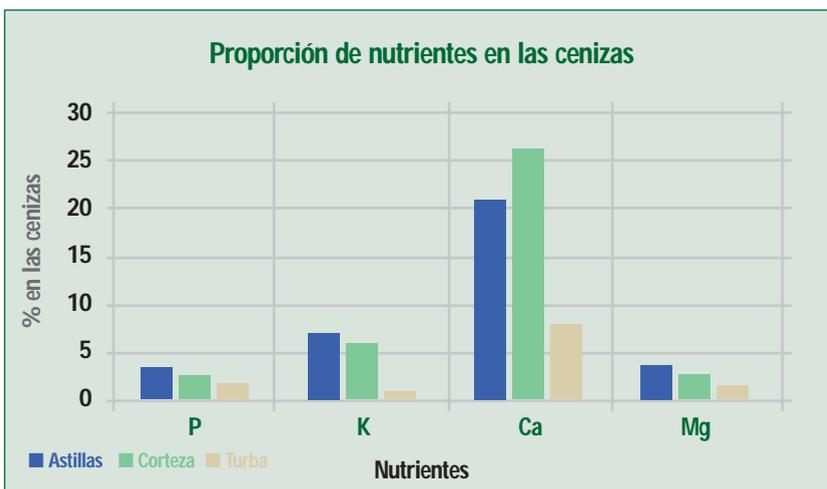


Figura 73: Proporción de nutrientes en las cenizas de biomasa
(Fuente: Hakkila & Kalaja, 1983).

- Humectación y preparación (granulado o compactación en forma de pelets o similar y fragmentación) de las cenizas antes de su aplicación.
- Aplicación, empleando equipos a menudo similares a los empleados para enmiendas calizas o fertilización, tipo abonadoras centrífugas sobre autocargadores con contenedores de carga por tolva superior. También se emplea la fertilización con ceniza desde helicópteros. Según Kalio y Leinonen (2005) el resultado más barato y regular se obtiene con autocargadores equipados con contenedores y con dispositivos de dispersión con ventiladores (mejor que con distribuidores centrífugos de tipo “plato giratorio”). También, según los mismos autores, parece más fácil distribuir las cenizas granuladas que con otras formas de preparación.

Un autocargador puede tener un rendimiento de fertilización con cenizas de entre 40 y 80 toneladas por día, lo que lleva a costes de aplicación de 14 a 22 €/tonelada, a lo que habría que sumar de 5 a 11 €/tonelada de ceniza por el transporte en un radio máximo de 60 km. Estos costes están subvencionados en Finlandia alrededor de un 50% (Emilsson, 2006).

3.4. Otros impactos de los aprovechamientos

Otras prácticas recomendables serán las orientadas a reducir la erosión, especialmente en pendientes fuertes, desde evitar hacer aprovechamientos extrayendo hojas y ramillos cuando las pendientes superen ciertos límites, hasta todas las medidas recomendadas para evitar la formación de rodadas, daños en pistas y trochas, compactación edáfica, etc., a saber:

- Planificar adecuadamente las infraestructuras, incluyendo trochas, de forma coordinada con los responsables de gestión y control ambiental.
- Para evitar el taponamiento de cunetas, limpiar los restos que puedan quedar abandonados y depositarlos en el talud de terraplén y pasar la rueda del tractor para eliminar taponamientos con tierra.
- Se debe limitar y controlar la producción de rodadas en las pistas. Las pistas no deben presentar rodadas profundas (>15 cm) o encauzamientos de más de 50 m, el ejecutor debe prevenirlas o repararlas. En terrenos sensibles donde la reparación no sea fácil, los ejecutores deben limitar el uso de las pistas en épocas muy lluviosas.
- Se debe dotar a las pistas, tras los aprovechamientos, de badenes o tajeas para el drenaje superficial, separados entre 40 y 75 metros (menos cuando la pendiente sea mayor).
- Se debe reparar por el ejecutor los posibles daños en las pistas y en las infraestructuras de drenaje o cruce con cauces.
- Las calles o arrastraderos por los que circulen vehículos deben tener longitudes no excesivas (nunca más de 500 metros) y pendientes limitadas a 25% o, puntualmente, 35%.

- Tampoco se deben producir, en estas calles o arrastraderos, rodadas profundas, por lo que hay que limitar el uso en tiempo de lluvias fuertes.
- Los ejecutores deben llevar a cabo “cortes de agua” después de las cortas, de forma sencilla y frecuente (entre cada 10 y cada 50 metros de calle, más cuanto mayor sea la pendiente).
- Para evitar daños en los cursos de agua, hay que planificar los cruces con arroyos, habilitando caños, puentes, etc. dentro de la planificación de la red de pistas.
- En general, se debe limitar el acceso a los cursos de agua al mínimo posible, cruzándolos siempre en ángulo recto. No se permitirá arrastrar a lo largo de los lechos y se mantendrá una franja de vegetación inalterada de entre 10 y 20 o más metros a ambos lados de los cursos de agua.

Para evitar los daños a la masa remanente, tanto los golpes y heridas como la aparición de enfermedades y plagas, convendrá respetar, además, las siguientes normas:

- En masas de coníferas, o con otras especies sensibles a los perforadores, no se debe tener madera ni restos gruesos cortados recientemente en la época de actividad de los escarabajos que forman plagas (primavera y principios de verano, sobre todo). En esos casos, habrá que extraer la madera en no más de un mes tras su apeo, y cargarla en los transportes o astillarla de forma inmediata a su extracción.
- Las calles deberán trazarse en línea de máxima pendiente, no deberán estar excesivamente cerca –15 metros mínimo si hay pendiente, 18 a 20 en terreno llano– y deberán ser suficientemente anchas –un metro más que las máquinas– para evitar los golpes en los árboles de los bordes. En terreno llano, las calles deben entroncar en las pistas en un ángulo abierto, para evitar las maniobras de entrada en la pista con cargas voluminosas, en que se dañan los árboles de borde.
- Los árboles completos deben manipularse para su apilado y carga en el autocargador con gran cuidado y suficiente habilidad y preparación por los operarios, especialmente si los árboles están en savia (primavera y verano). Es importante que los tractoristas tengan experiencia y estén informados sobre la importancia de evitar los daños.

Además, es esencial, como en cualquier aprovechamiento forestal en el ámbito mediterráneo, tomar medidas preventivas del riesgo de incendios, y en todo caso evitar el dejar basuras o residuos en los montes. El recipiente, bidón o bolsa que se ha llevado lleno de combustible, aceite o comida, debe volver vacío y depositarse en el lugar adecuado, fuera de los montes.

PRÁCTICAS RECOMENDABLES POR RAZONES DE SEGURIDAD Y SALUD

Al tratarse de aprovechamientos generalmente mecanizados, se aportarán “buenas prácticas” generales para maquinistas forestales, seguidas de prácticas específicas para los tipos de máquina empleados (cosechadora, autocargador, palas de carga y astilladoras), que se han adaptado de diversas fuentes, entre las que destacan las Guías de Seguridad elaboradas por la Fundación para el Fomento de la Formación Forestal (www.fundacionf4.org), como traducción de las Safety Guides del FASTCo del Reino Unido (aunque, habiéndose reestructurado recientemente esta institución, la actual organización responsable de la edición original de estas guías es AFAG).

4.1. Prácticas genéricas para los tractoristas forestales

General

- Los maquinistas deben haber recibido **formación específica** relacionada con el manejo del tipo de máquina que estén empleando.
Se debe operar usando las técnicas y dentro de los límites establecidos por el fabricante.
- Las máquinas nuevas deben contar con la **homologación o certificación CE**. Las máquinas más antiguas deberán haber sido **adaptadas al R.D. 1215/1997** (señalización luminosa, señalización acústica de marcha atrás, etc.)
- En el vehículo deben ir **sólo las personas para las que esté diseñado**, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. No se transportarán personas en el remolque o sobre la pala.
- Las máquinas deben contar con **dos extintores**, que se deben mantener en perfecto estado, realizando las revisiones periódicas que indique el fabricante. **Los tubos de escape de todas las máquinas deben contar con silenciador y matachispas**.
Se debe **utilizar cinturón de seguridad y no dejar objetos sueltos en la cabina**.

Características de las máquinas

- Los puestos de control de los vehículos (incluidas las grúas para la carga de camión o alimentación de astilladora) deben estar protegidos por **cristales de se-**

guridad contra impacto. Las cabinas de las máquinas forestales automóviles deben cumplir los estándares de seguridad contra vuelcos y contra impactos (ROPS y FOPS)

- Las partes peligrosas de las máquinas (por ejemplo, una toma de fuerza) deben estar protegidas y señalizadas.

Mantenimiento

- Se deben **realizar todas las operaciones de mantenimiento de acuerdo con las instrucciones del fabricante** de la máquina. El mantenimiento se debe realizar **con el vehículo parado, calzado y en terreno llano**, accediendo al mismo por las partes indicadas para ello.
- Se deben emplear **recipientes homologados para el repostado** de combustible. Por supuesto, **nunca se fumará durante esta operación, que se deberá producir en una zona apartada del lugar de trabajo, sin especiales riesgos de incendio y sin luz solar directa**. Se repostará **con el motor y las luces apagadas** y se alejarán los depósitos de combustible de la máquina un mínimo de 3 metros antes de arrancar. Si se producen derrames, hay que limpiarlos antes de arrancar la máquina.
- No se debe elevar manualmente los tanques de fuel para repostar. Si se requiere alimentación por gravedad para dicha operación, los bidones deben situarse de forma segura sobre pilas de madera bien formadas, bordes de talud, etc.
- Se debe cortar inmediatamente cualquier vertido de aceite. No hay que usar las manos para comprobar pérdidas de aceite, sino un trozo de papel o cartón. El aceite hidráulico a presión puede penetrar a través de la piel y producir gangrena.
- Si es posible, el operario debe asegurarse de que el aceite hidráulico en los sistemas que deben ser reparados no se encuentre bajo presión. Si no es posible descargar el aceite de presión, se debe aflojar muy cuidadosamente las juntas liberando gradualmente la presión.

Planificación

- **Una persona responsable, además del maquinista, debe conocer el plan de trabajo diario**, y se debe establecer un **procedimiento de actuación en caso de emergencia**. Es útil la comunicación con portátiles, incluyendo la definición de una señal de emergencia.
- **Es obligatorio inspeccionar previamente el área de trabajo** para identificar los lugares de riesgo y planear el trabajo para que las ramas y puntas sirvan de apoyo en terrenos difíciles.
- Cuando las operaciones sean potencialmente peligrosas para los usuarios de cualquier vía pública (carretera, camino o sendero), éstas no deben comenzar hasta su cierre. **En todos los accesos al área, se debe disponer señales de peligro, prohibiendo el paso de personal no autorizado.**

Operativa

- En las operaciones en que sea necesario, hay que asegurarse de que el freno de estacionamiento o de carga esté conectado (y no olvidar soltarlo antes de poner la máquina en marcha). Si hay pendiente, se parará la máquina en posición recta encarada con la línea de máxima pendiente.
- Hay que emplear cadenas y/o semiorugas según las condiciones del terreno y los cambios.
- Se mantendrá una **distancia de seguridad hacia cualquier persona que se encuentre en un radio de dos veces el alcance de la grúa**, debiendo detenerse las operaciones si alguien penetra en dicho radio de seguridad. En cualquier caso, nunca se suspenderán cargas por encima de operarios u otras personas. Se mantendrá una **distancia de seguridad mínima de 15 metros** entre cualquier parte de la máquina (por ejemplo, la pinza de la grúa) y cualquier torre de acero de **líneas eléctricas** (9 metros si se trata de postes de madera)
- La máquina debe contar con iluminación adecuada para trabajar en condiciones de luz escasa. Es necesario contar, además, con una linterna de mano potente.
- Hay que retirar los residuos inflamables que puedan engancharse en los bajos de la máquina u otras áreas similares.
- Durante la marcha, se debe **evitar la pendiente lateral excesiva**.
- **Si hay inestabilidad por la pendiente, sea lateral o longitudinal, es conveniente extender la grúa hacia el lado más alto** para ganar estabilidad.
- Hay que asegurarse que la grúa está en la posición de transporte antes de poner la máquina en marcha.
- Hay que evitar conducir, salvo que sea necesario para limpiar el camino, sobre árboles apeados o trozas.
- Se deben **mantener las ventanillas y puertas cerradas durante la conducción**.
- El personal autorizado que desee aproximarse a la máquina debería contactar primero con el tractorista. Si no es posible, debe hacerse la aproximación por la zona de mejor visión.
- Para el transporte de la máquina en una góndola, hay que asegurarse de que la posición de la grúa u otros órganos de trabajo es la más adecuada, y de que respeta las dimensiones máximas de las vías a atravesar en la ruta de transporte –altura, anchura y peso máximo autorizados–.

EPIS

- El maquinista debe llevar los siguientes **EPIs (equipos de protección individual): protectores para los oídos excepto si el ruido en la cabina es inferior a los 85 dB, guantes resistentes al aceite hidráulico para manipular madera o materiales, botas de seguridad, elementos de limpieza y botiquín de primeros auxilios**. Se llevará, además, casco, cuando se tenga que bajar del vehículo y

haya posibilidad de caída de ramas u otros riesgos de golpes en la cabeza.

- **En el mantenimiento, se debe trabajar con ropas ajustadas, para evitar atrapamientos**
- Hay que **subir y bajar a los vehículos por las zonas habilitadas a tal fin**, cuyos asideros y estribos deben mantenerse limpios y en buenas condiciones.
- Tanto la subida como la bajada al vehículo se realizarán **de cara al mismo y sin saltar**.

Situaciones de riesgo

- En caso de atasco de la máquina, **se debe parar el motor y, en su caso, cortar la corriente, antes de intervenir para desatascar los elementos afectados**.
- Si la máquina patina conduciendo hacia abajo, hay que soltar los frenos, aumentar gradualmente la velocidad y continuar en línea recta hacia delante hasta que se recupere la tracción. Nunca se debe desembragar.
- **Si la máquina vuelca**, se debe permanecer atado (con el cinturón) en el interior de la cabina, no intentando **nunca saltar desde la misma**.
- Para situaciones inesperadas (climáticas, topográficas o mecánicas) es conveniente conocer las técnicas de conducción de emergencia, sólo para mover la máquina hasta una posición segura.

4.2. Medidas específicas para la cosechadora o procesadora

- Aspectos generales a considerar desde el punto de vista de la **seguridad y salud** son:
 - No se debe sobrecargar la máquina, dado que perdería estabilidad. No se debe manipular con la grúa árboles de pesos (o tamaños) superiores a los indicados por el fabricante o recomendados por la experiencia.
- Respecto a la **ejecución del trabajo** se debe tener en cuenta lo siguiente:
 - **Se interrumpirá la tarea inmediatamente si cualquier persona o máquina entra en la zona de peligro** especificada para la máquina –generalmente, en un radio igual a la longitud de la grúa más dos veces la altura de los árboles–. (Se pueden hacer excepciones de supervisión, entrenamiento o estudio de tiempos).
 - Cuando alguna máquina (que debe tener, en todo caso, protección suficiente para su operador) necesite trabajar dentro de este radio, hay que evaluar el riesgo y planificar un sistema de trabajo lo más seguro posible en cada caso.
 - Se evitarán maniobras rápidas de la grúa hacia la cabina, independientemente del grado de protección del tractorista. Tampoco en dirección a ninguna persona que se encuentre en un radio de 200 m.

Prácticas recomendables por razones de seguridad

- Hay que dejar el material procesado en una posición segura y estable, con un acceso seguro para la maquinaria de saca.
 - Para facilitar la estabilidad, las pilas de árboles deberán ser paralelas a la pendiente o estar apoyadas en árboles en pie para evitar su deslizamiento.
- El adecuado **mantenimiento** es fundamental para evitar situaciones problemas durante el trabajo:
- **Extraer y revisar, como mínimo una vez al día, el útil de corte, siempre inmediatamente después de cualquier incidente** que pueda haberlo dañado. Inspeccionar particularmente las grietas en los elementos de la cadena, asegurándose además del alineamiento correcto.
 - **Reparar o renovar la cadena con la debida periodicidad**, manteniendo todos sus elementos (incluyendo los limitadores de profundidad) de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
 - Asegurarse del buen funcionamiento del sistema de lubricación de la cadena.
 - Los equipos hidráulicos quedarán en la posición más baja posible y la presión hidráulica se liberará (si su diseño lo permite). La espada quedará escondida o las cuchillas en posición segura.

4.3. Medidas específicas para el autocargador

- Respecto a la **ejecución del trabajo**, se debe tener en cuenta lo siguiente:
- Cuando se carguen varios árboles, fustes o trozas, hay que asegurarse de que **las pinzas de la grúa rodean perfectamente el paquete de piezas**.
 - **No se sobrecargará el remolque**, evitando cargar por encima del nivel máximo de la caja o de los puntales (teleros).
 - **El freno de carga o de aparcamiento debe echarse mientras se está cargando**.
 - Las pilas de madera o de árboles completos se deben hacer en una posición estable. **La altura de las pilas** no debe superar mucho la altura de un metro si debe ser manipulada manualmente con posterioridad, y **no debe superar la altura de dos metros salvo excepciones justificadas**.
- Se debe conocer como actuar ante **situaciones de riesgo**:
- Para reducir el riesgo de vuelco longitudinal **en terrenos en pendiente y cuando las calles sólo tengan salida por un lado, se entrará en vacío**:
 - **marcha atrás y hacia abajo cuando el acceso sea por la parte más alta, o**
 - **marcha adelante y hacia arriba cuando la entrada sea por la zona inferior.**
 - En terrenos con mucha pendiente, para reducir el riesgo de deslizamiento de la carga cuando el autocargador se desplace hacia arriba, se puede disponer en la

- parte trasera de la plataforma ramas o copas para elevar la carga en esa zona.
- En terrenos pendientes, se debe cargar o descargar con el autocargador orientado hacia la máxima pendiente, y no en diagonal. Conviene aprovechar los tocones, rocas o desigualdades del terreno para calar las ruedas.
 - Si hay inestabilidad, se debe transportar la carga agarrada con las pinzas de la grúa cerca del suelo mientras se acerca al cuerpo de la máquina, y sólo elevarla del suelo cuando esté cerca de la caja.

4.4. Medidas específicas para la astilladora y para su alimentación mecanizada

- El adecuado **mantenimiento** es fundamental para evitar situaciones problemas durante el trabajo:
 - **Hay que chequear diariamente dos veces, antes de comenzar los trabajos y en la mitad de cada turno de trabajo, el estado de las cuchillas.** En ambos casos, hay que regular y ajustar la posición de las cuchillas de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
 - **Cuando se cambien las cuchillas, siempre hay que limpiar de serrín y trozos de biomasa el útil de astillado.**
 - **Después de cada cambio de cuchillas, todos los trabajadores deben permanecer fuera de un amplio radio de seguridad hasta que el maquinista haya llevado el útil de astillado a su velocidad de régimen normal,** comprobando que los elementos de trabajo están debidamente asegurados.
- Respecto a la **ejecución del trabajo** se debe tener en cuenta lo siguiente:
 - Si se desconecta la astilladora de la cabeza tractora para que funcione de forma semi-fija, hay que asegurarse de que las **patas hidráulicas** están **desplegadas adecuadamente** y de que las **ruedas** están **bloqueadas antes de comenzar el astillado.**
 - Hay que **comprobar que el material con que se alimenta la astilladora está libre de piedras.** Si se sospechase que el material incorpora piedras u otras impurezas, se debe sacudir con la pinza de la grúa cada pinzada para facilitar su limpieza.
 - Además de tomar precauciones para que las piedras o metales no lleguen al mecanismo de alimentación, habrá que **desenganchar las ramas u otros restos que queden atascados** en dicho mecanismo. Cuando la grúa de alimentación no sea suficiente, se empleará un bichero (una pértiga terminada con un gancho).
 - No habrá ningún operario alimentando la astilladora manualmente si está no está diseñada con ese objetivo. Existe un riesgo de salida de materiales (astillas, fragmentos de madera, ramas) a gran velocidad por la boca de alimentación.
 - Siempre que sea posible, **evitar el soplado de astillas contra el viento.**
 - Debe respetarse una **zona de seguridad de 18 metros tanto delante como detrás de la cañonera.** Cuando la cañonera sea plegable y esté desplegada, hay que bloquear el pasante de seguridad adecuadamente antes de comenzar el trabajo.

Prácticas recomendables por razones de seguridad

- ❑ **Antes de comenzar a astillar y de que la cañonera comience a enviar material al área de descarga, hay que comprobar que está despejada de cualquier operario** u otras personas. No se debe permitir que acceda ningún operario en la zona de seguridad cuando el motor de astillado esté en marcha o mientras el órgano de astillado no se haya detenido completamente.
 - ❑ **El mecanismo de parada de emergencia debe mantenerse en buen estado, señalizado y accesible** al maquinista con facilidad en condiciones normales.
- Los **riesgos para la salud** se enumeran a continuación:
- ❑ **El ruido** es uno de los principales riesgos para la salud en este tipo de trabajos, por lo que **todos los trabajadores deben llevar una protección auditiva adecuada**. Los operarios de tierra, en su caso, o el propio gruísta o palista cuando bajen al suelo, pueden correr riesgo de aplastamiento por desprendimiento de la carga. **Aunque nunca debe haber nadie debajo de una carga en movimiento, los operarios que puedan tener que estar en sus proximidades deben llevar casco y botas reforzadas. La protección ocular es obligatoria salvo que se trabaje dentro de cabinas perfectamente aisladas.**
 - ❑ También el **polvo** puede suponer riesgos para la salud, por lo que lo recomendable es que **las cabinas** en que trabaje el gruísta o palista estén **dotadas de filtros de aire o mecanismos de sobrepresión. Los operarios sujetos a la inhalación de polvo deben protegerse mediante mascarillas.**
 - ❑ Uno de los riesgos **posteriores al astillado** se debe a las **reacciones anaerobias que se producen en el interior de las pilas de astillas, que dan lugar al aumento de temperatura y desprendimiento de gases, en ocasiones inflamables.** Aunque la principal norma se refiere a evitar el almacenamiento de astilla en lugares cerrados o deficientemente ventilados, otra norma para prevenir la autocombustión es **evitar un excesivo tamaño de los montones** (se recomienda hacer montones que no superen los 40 ó 50 metros cúbicos de astilla si se van a dejar durante cierto tiempo en el cargadero).
- La **forma de trabajo cuando junto con la astilladora se empleen grúas o palas cargadores para alimentar la astilladora** se detallan a continuación:
- ❑ Cuando se utilice una pala cargadora o grúa especial tipo “pulpo” para alimentar la astilladora, sólo el operario de la misma podrá encontrarse en las proximidades de la astilladora cuando se encuentre en movimiento.
 - ❑ En este caso (o si se usa este tipo de máquina para cargar un camión), conviene **establecer un código de señales audibles (pitidos de la máquina) o visuales (ráfagas de luz)** para comunicar al operario de la pala cargadora con el resto de trabajadores. Por ejemplo, una señal puede significar “Pare”, dos señales “Mueva la máquina o el camión hacia delante”, tres señales “Mueva la máquina o el camión hacia atrás” y una serie de señales cortas y repetidas, “Peligro”.
 - ❑ **No se debe permitir a otros miembros del equipo aproximarse a la pala car-**

gadora o grúa hasta no haber recibido una señal clara y previamente convenida de conformidad por parte del palista o gruista.

- Los operarios auxiliares deben notificar al palista o gruista de una forma clara, preestablecida y rápida la detección de una situación de riesgo, de modo que el trabajo pueda detenerse con rapidez.

4.5. Medidas específicas para la carga de camiones

- Los aspectos a considerar durante la carga de los camiones y si se utilizan palas cargadoras son las que se detallan a continuación:
 - **La carga debe producirse sobre terreno estable**, con una distancia adecuada al punto de recolección de la carga y que **no obligue a suspender la misma por encima de la cabina del camión**. Durante la operación, el freno de estacionamiento debe estar activado, y el freno de giro debe haberse soltado.
 - Durante la carga de un camión de astillas (o de árboles completos, o de cualquier otra carga), es importante **mantener la comunicación entre el conductor del camión y el palista o gruista**, a poder ser mediante señales preestablecidas como las que se han indicado (pitidos o señales luminosas).
 - **En la pala o grúa empleada para la carga habrá un solo tractorista**, que ejecutará antes del trabajo las labores de mantenimiento indicadas por el fabricante y realizará los movimientos de diagnóstico de la grúa o pala.
 - El operario del vehículo cargador **deberá tener buena visibilidad del cargadero y del camión** que debe ser cargado. **El operario debe detener la máquina si aprecia la entrada inesperada y no planificada de alguna persona** en el radio de seguridad de la máquina.
 - **Se debe evitar cuidadosamente cargar tierra o piedras** con los árboles o astillas, sacudiendo la carga si fuese necesario.
 - La capacidad de la pala o grúa debe emplearse al máximo (siempre sin superar las cargas máximas definidas por el fabricante).
 - **Nunca se debe golpear con la carga el camión o ninguna de sus partes. No se debe dejar caer la carga con brusquedad.**
 - No se debe **nunca cargar cuando la carga suspendida debe pasar por encima de trabajadores** que no estén protegidos por una cabina de seguridad homologada
 - Se debe **evitar dañar los árboles remanentes** cercanos al cargadero.
 - Se debe **evitar la proximidad de líneas eléctricas o de otras máquinas**, de acuerdo con las normas generales. También tienen particular importancia en las operaciones de carga la señalización en las vías de acceso para evitar el ingreso de personal no autorizado o desconocedor de los riesgos.
 - **Si el operario debe bajar de la grúa o pala, debe detener el motor y dejarla a nivel de suelo**. Si el trabajo a desempeñar conlleva riesgos de aplastamiento por cargas suspendidas o atascadas, debe llevar los correspondientes EPIs.

EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE BIOMASA EN LOS RESALVEOS DE MONTES BAJOS DE REBOLLO

El presente capítulo está basado en experiencias reales de aprovechamientos de biomasa realizados en dos montes de Castilla y León, Valsemana y Los Corrales, en el Término Municipal de La Ercina (León), en otoño de 2006. En él, se hará referencia a los métodos de trabajo, las características de los montes estudiados y los valores de rendimientos y costes observados, aunque también se comparará con referencias de otras fuentes. Las experiencias fueron coordinadas y financiadas por la Junta de Castilla y León y por la Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (CESEFOR).

5.1. Fases y alternativas técnicas del sistema

Se trata de un sistema de aprovechamiento de árboles completos, en que se extraen árboles de pequeño tamaño procedentes de clareos y claras (las llamadas “entresacas”) sobre masas de roble o encina en que anteriormente no resultaba rentable actuar.



Fig. 74: Métodos de producción de astillas en los países escandinavos (Fuente; adaptado de Alakangas-VTT- en Sikanen y Tahvanianen, 2006).

Los métodos de producción en los países escandinavos, donde este tipo de intervenciones tiene más tradición y está creciendo en los últimos años, se muestran en la *Figura 74*.

Un esquema más completo que se adapta a la situación en Castilla y León, se presenta en la *Figura 75*, en que se añaden algunas posibilidades, como el uso de motosierras o “procesadoras” convencionales (no multitaladores).

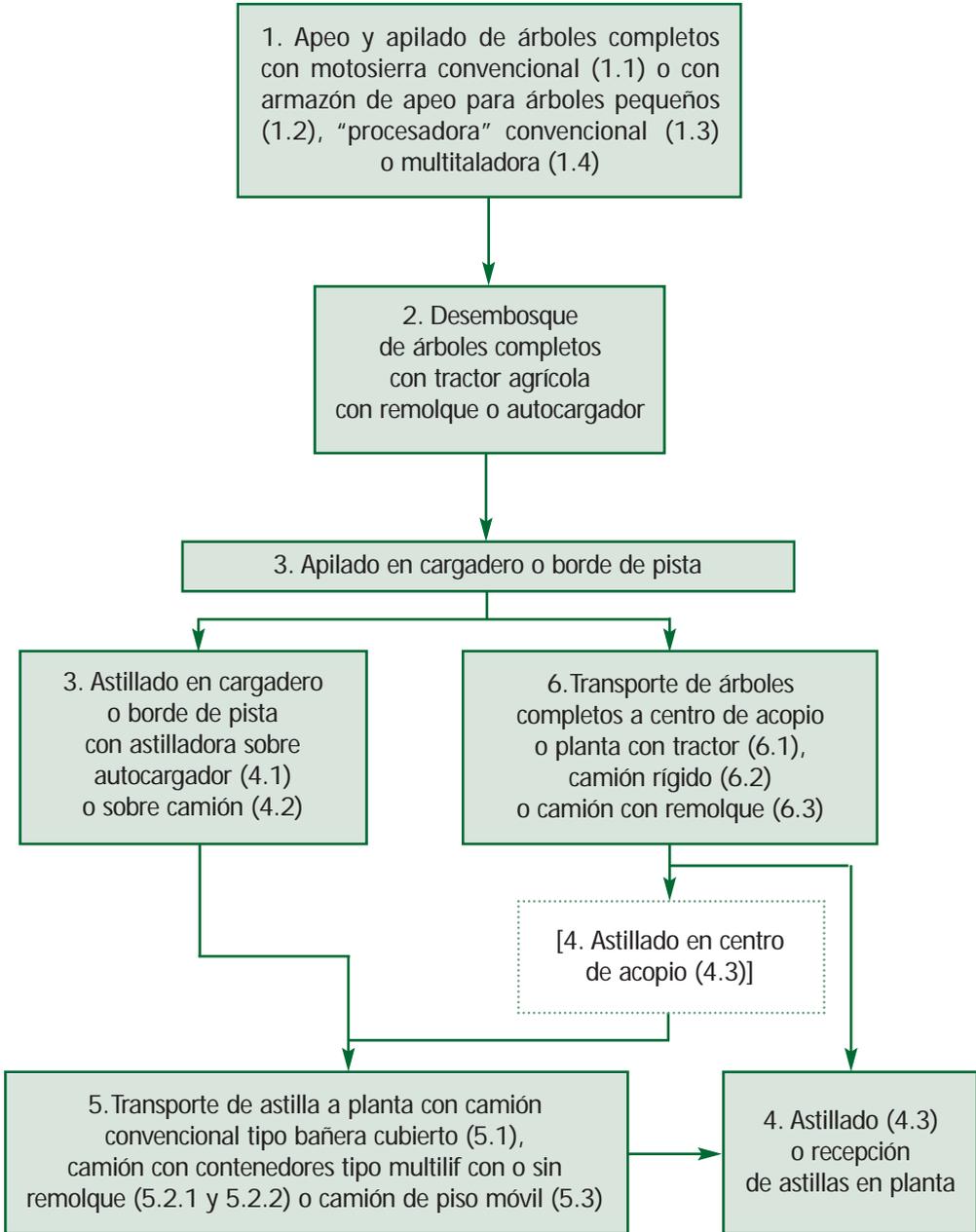


Figura 75: Esquema de las posibilidades de aplicación del sistema en Castilla y León.

5.2. Evaluación del recurso: significación selvícola, importancia y localización en Castilla y León. Tabla de diámetros–pesos de biomasa

Las masas de rebollo ocupaban 722.773 ha en Castilla y León en 2002, según el tercer Inventario Forestal Nacional, siendo en la región la segunda especie y la segunda frondosa. De ellas, el 43% corresponde a tallares sobre masas monoespecíficas (Roig, 2006), es decir, más de 300.000 ha en las que potencialmente se puede practicar tratamientos productores de biomasa, como claras o resalveos. La evolución de la superficie forestal de esta especie en Castilla y León en las últimas décadas se muestra en el gráfico de la *Figura 76*.

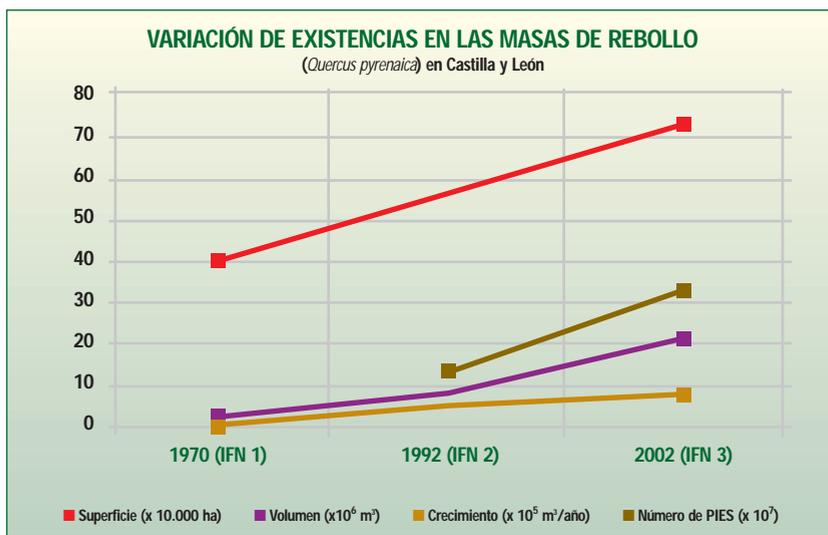


Figura 76: Evolución de las existencias y cabidas de los rebollares de Castilla y León.

De acuerdo con los inventarios realizados para este estudio, los tallares densos de rebollo en estado de latizal estudiados tenían una espesura media de 140 m³/ha, que equivaldrían, supuesto un 15% de peso de biomasa adicional sobre la del fuste, a unas 160 t/ha de biomasa en verde, de la que se podría extraer una fracción entre el 25 y el 40% en el caso más general.

Muchas de estas masas regulares espesas proceden de cortas a mata rasa de mediados del siglo XX para obtener carbón o leña.

La producción de madera de esta especie es casi nula, si bien se emplea con frecuencia para leña, aunque el grado de comercialización es muy pequeño en relación con su crecimiento. Se están explorando usos alternativos, como la fabricación de duelas para barriles de vino.

El peso de biomasa que contienen los rebollos, estimado a partir de una muestra de 21 árboles apeados, cuya biomasa fue pesada por fracciones de tamaño y después secada (varias muestras por pie) para estimar su humedad, se representa en la *Figura 77* y en la *Tabla IV*. Según ella, si en una corta de 10 hectáreas hubiese previsto extraer, por ejemplo, 4.800

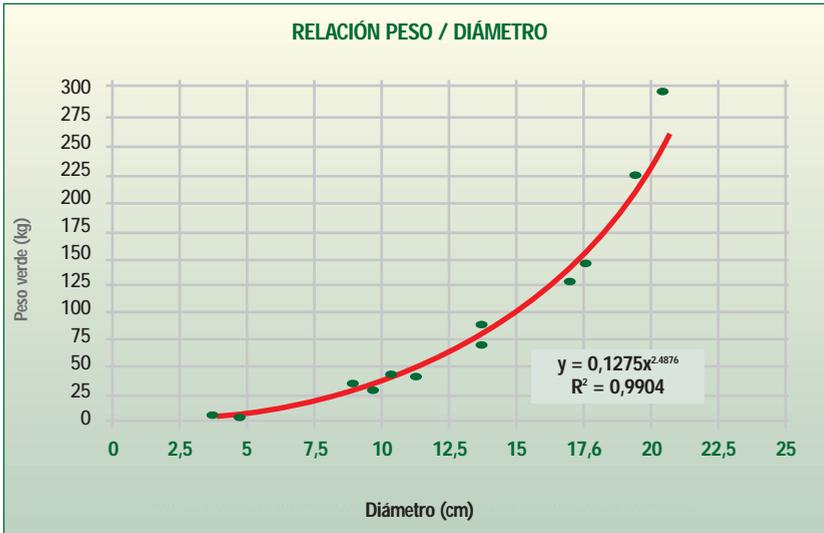


Fig. 77: Peso de biomasa (incluyendo el fuste) en función de su diámetro.

pies de aproximadamente 7,5 cm, 3.500 de unos 10 cm, 2.500 de unos 12,5, 1.200 de unos 15 cm y 900 de unos 17,5 cm, la producción total máxima –si se fuese capaz de extraer toda la biomasa– en verde sería de 679 toneladas, esto es, unas 68 t/ha (en peso completamente seco, esto equivaldría a 410,9 toneladas secas, esto es, unas 41 por hectárea).

Díámetro normal (cm)	Peso verde al 40-50% H s/peso verde (kg)	Peso seco de biomasa (kg)
5	7,0	3,8
7,5	19,4	9,8
10	39,6	21,7
12,5	69,1	41,3
15	108,9	70,5
17,5	159,9	111,2
20	223,1	165,4

Tabla IV: Peso de biomasa (incluyendo el fuste) en función de su diámetro con humedad del 40-50% y en peso seco.

5.3. Breve descripción de las experiencias estudiadas

Se han estudiado dos resalveos o “entresacas” fuertes sobre montes de roble o rebollo, concretamente en dos montes de la Junta de Castilla y León en León, pertenecientes al Término Municipal de La Ercina y llamados “Valsemana” y “Los Corrales”. El primero de ellos tiene una pendiente media del 12% y matorral (brezal) cubriendo hasta el 50% de la superficie, y el segundo sin pendiente y con apenas matorral y rebrote, puesto que era pastoreado por vacas. Dentro de Valsemana, se definieron dos estratos (Valsemana 1 y Valsemana 2) en fun-

El aprovechamiento integral de biomasa en los resalvos de montes bajos de Rebollo

ción de la pendiente, mayor en el segundo, que también tenía menor densidad y un diámetro normal ligeramente inferior.

La densidad de la masa en pies por hectárea por categorías de diámetro se representa, antes de la corta, en la *Figura 80*, a y b.

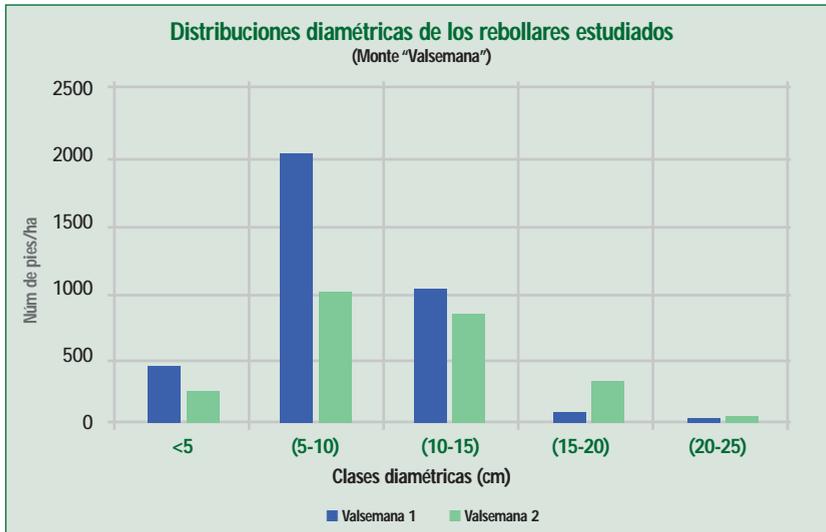
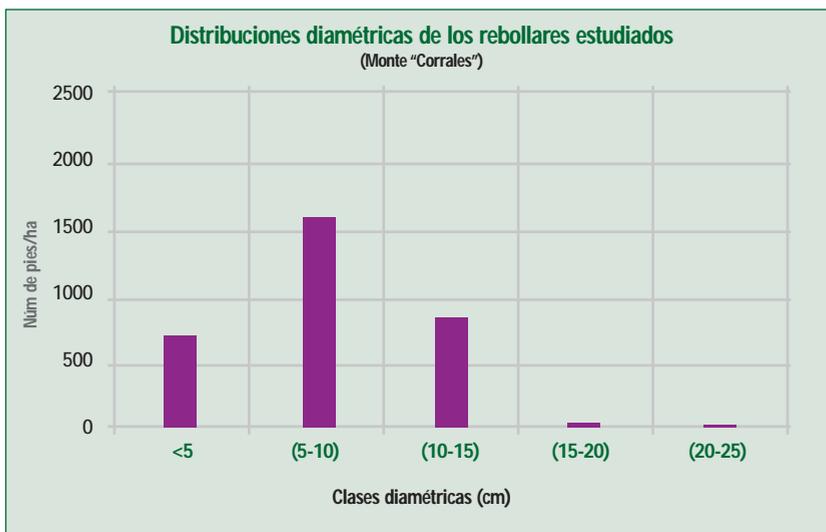


Figura 80, a y b: Distribución diamétrica en los montes estudiados.



Se presentan a continuación algunas imágenes –*Figuras 81 a 83*– relativas a la aplicación de este sistema de aprovechamiento en los citados montes. En ambos casos se empleó una cosechadora (“procesadora”) convencional adaptada mediante un apero para poder trabajar como multitaladora, que fue operada por la empresa Maderas Rubial. La extracción de árboles completos se produjo mediante autocargador y el astillado se produjo en el cargade-



Figuras 78 y 79: Aspecto de los montes Valsemana (izquierda) y Corrales (derecha) antes de la ejecución del aprovechamiento.

ro, con una astilladora Pezzolato 900/1000 sobre camión, operada por la empresa portuguesa *Logística Florestal*, y se descargó directamente sobre camiones rígidos convencionales (“bañeras”) de 45 metros cúbicos aparentes de capacidad.



Fig. 81: Cosechadora y cabezal adaptado como acumulador.



Fig.82: Autocargador extrayendo árboles completos.

En ambos montes el sistema de trabajo fue exactamente el mismo, para poder comparar las diferencias de rendimiento en función de parámetros tales como la pendiente, el diámetro medio o la espesura.

El número de pies extraídos, como media en ambas intervenciones, fue de 2.005 sobre una densidad inicial de 3.131 (64%). El diámetro medio de los pies extraídos fue de 9,5 cm. Las cantidades de biomasa extraídas fueron de 58 t/ha en Valsemana y 55 t/ha en Los Corrales, correspondiendo a un porcentaje de la biomasa total en pie del 55 y el 40%, respectivamente.



Fig.. 83: Astillado con astilladora en camión sobre “bañera”.

	Valsemana 1	Valsemana 2	Corrales
Pendiente (%)	10,0	14,5	1,0
Matorral (% superficie)	35	20	35
Altura media matorral (m)	1,30	1,00	0,30
Densidad (pies/ha)	3650	2593	3150
Diámetro medio (cm)	8,52	10,2	7,9
Área basimétrica (m ² /ha)	24,15	25,67	18,53
Altura media (m)	8,62	6,68	6,2
Altura dominante (m)	17	14,75	10,9
biomasa fresca (t/ha)	135,5	160,5	103
biomasa seca (t/ha)	81	97,3	61,5

Tabla V: Características de los aprovechamientos de biomasa estudiados.

Como resultado de estos estudios, se presentan a continuación algunas recomendaciones operativas, acompañadas de datos de rendimientos y costes, que pueden servir de orientación a técnicos, gestores o empresarios interesados en este tipo de aprovechamientos.

5.4. Consideraciones previas al aprovechamiento de biomasa

5.4.1. Selección del lugar del aprovechamiento

Seleccionar o desechar un lugar de trabajo dependerá de las siguientes características:

- **El tamaño y la homogeneidad del aprovechamiento.** Estos son factores de primer orden. Cuanto más grande y más homogéneo sea un lugar de aprovechamiento, mayor será la productividad. Los lugares con numerosas especies o clases diamétricas suponen

un descenso importante de la productividad (Alakangas, 1999). Los montes pequeños no resultan rentables, especialmente si el sistema es mecanizado y requiere el transporte de más de una máquina. Los portugueses, aunque frecuentemente trabajen en montes más pequeños por motivos sociales o de oportunidad, estiman en 500 toneladas verdes de astillas el mínimo tamaño para un esquema de saca de restos y astillado fijo (Lagoa, 2005).

- **La carga de biomasa a extraer por hectárea.** De acuerdo con Sydved en Suecia, en 2005, se consideraba rentable actuar por encima de 40 a 50 toneladas verdes de restos por hectárea, para la rentabilidad en extracción de restos de cortas a hecho. Desde entonces, la demanda ha aumentado, lo que ha hecho subir los precios y, por tanto, entrar en rentabilidad ciertos aprovechamientos con producciones inferiores. La extracción de árboles completos de claros, que al contrario que la recogida de restos de cortas a hecho, está subvencionada, solía llevarse a cabo con producciones de 30 a 50 MWh por hectárea (aproximadamente, poco más de 15 t verdes de astilla). En rebollares con características similares a los del estudio, la biomasa a extraer por hectárea está en torno a las 50-55 t/ha (1 t verde \approx 2,5 MWh, para la astilla extraída de los rebollares). Si se aceptan las referencias sobre límites de rentabilidad operativa obtenidos en Portugal (500 t), la superficie mínima para rentabilizar un aprovechamiento de este tipo serían de 9 a 10 ha.
- **La pendiente.** Una pendiente por encima del 30 % impediría la mecanización integral. Pendientes mayores pueden provocar el vuelco lateral de la cosechadora y, especialmente, del autocargador. En todo caso, en terrenos pendientes, se recomienda que sea el maquinista quien trace las calles, bajo el control, en su caso, de los técnicos o agentes de la Administración.
- **El matorral.** El matorral dificulta el trabajo al impedir la visión de la base del tronco. Esto aumenta la posibilidad de colisión del espadín con piedras y de cortes poco eficientes que afecten a árboles que deberían quedar en pie, y provoca que los tocones queden más altos. El matorral está en continuo contacto con los latiguillos de la maquinaria provocando rozamiento, enganches y tirones que pueden deteriorarlos. Por todo ello, se encarece el aprovechamiento, lo que hace preferibles en ese caso los cabezales de cuchillas.
- **La pedregosidad.** Las piedras suponen un riesgo de colisión para el cabezal, pudiendo dañar los elementos de corte. Además pueden desestabilizar la máquina y producir el vuelco.
- **La distribución de los pies.** En montes bajos o medios de rebollo los pies se pueden presentar concentrados en torno a viejas cepas, concentrados en golpes, siendo la distancia entre pies muy reducida e impidiendo un manejo fácil del cabezal multicorte. En caso de numerosos pies por cepa, son también preferibles los cabezales de cuchillas.
- **Las distancias de desembosque.** Se requiere que las distancias de desembosque no sean excesivas y que haya un lugar con espacio suficiente para cargadero, y que se pueda garantizar que esté en buen estado durante la época de trabajo –es importante evitar el encharcamiento, o tomar medidas paliativas si fuera inevitable, pero teniendo en cuenta la organización y los costes *a priori*–.

- **La distancia de transporte a la central de suministro.** La distancia de transporte a la central de suministro condicionará la rentabilidad del aprovechamiento, debiéndose seleccionar adecuadamente tanto el método de tratamiento de la biomasa bruta como su forma de transporte. Es tan importante este apartado que se tratará en detalle en los próximos apartados 5.4.2. y 5.4.4.

5.4.2. Planificación previa

Una de las primeras decisiones que se deben tomar antes de decidir un aprovechamiento de la biomasa forestal en cualquiera de sus variantes es el esquema general del aprovechamiento en cuanto a la **elaboración que se va a dar a la biomasa** antes de entregarla al demandante (que en principio, será un pequeño o gran consumidor final –para producir calor y/o electricidad– o un “almacenista” con capacidad de procesar la biomasa en un “terminal logístico” o centro de almacenamiento y procesado).

La decisión dependerá de las capacidades y especificaciones que este demandante imponga. En general, los demandantes son tanto más exigentes cuanto menor es su tamaño, como se especifica a continuación:

- En aplicaciones térmicas a escala doméstica o de pequeñas colectividades se exige astilla limpia, de granulometría pequeña y lo más seca posible.
- En el extremo contrario estarían los grandes consumidores o terminales logísticos con capacidad para el procesado posterior de la biomasa, que admitirán cualquier categoría de biomasa, aunque la pagarán a diferente precio en función de la humedad, tamaño y homogeneidad de las partículas, contenido en impurezas, etc.

En este último caso, la decisión sobre **si procesar o no la biomasa en monte** o cargadero es una cuestión de distancia de transporte, con el principio de que, dado que la preparación de la biomasa –astillado, limpieza, etc.– es siempre más eficaz y barata en destino, la mayor ventaja de su procesado en origen es la reducción de los costes de transporte. Así pues, tiene interés estudiar la dependencia entre las distancias de transporte y los costes conjuntos de preparación y transporte, que se describe con más detalle en el apartado 5.4.4 (Elección de medio de transporte)

Una primera consideración se refiere a que las distancias de transporte podrán ser cortas, pensando en consumidores de tamaño medio o grande, sólo si la densidad del recurso es elevada, es decir, en zonas forestales con abundante posibilidad productiva en biomasa y sin otras importantes limitaciones para este aprovechamiento.

La segunda importante decisión es, en caso de optarse por el procesado “in situ” de la biomasa, la elección de la **forma de ese procesado**, esto es, de si se va a pretriturar –con máquina de tornillo o tornillos lentos–, triturar –con máquinas rotativas de martillos o dientes– o astillar –con cuchillas, generalmente montadas sobre un tambor rotatorio–, la biomasa. Hay que observar que el valor añadido del material es máximo en el astillado –menor granulometría, mayor homogeneidad...– y mínimo en el pretriturado –grandes tamaños de partícula, menos homogeneidad–, por lo que sólo se elegirá esta opción cuando no haya más remedio, esto es, para el caso de abundancia de piedras, elementos metálicos u otras impurezas en el material a triturar.

En el caso de los **robles pequeños**, salvo casos muy extraños – zonas con abundantes balas de la guerra civil, comarcas muy arenosas -, el manipular los árboles completos con cierto cuidado garantiza que no van a incorporar piedras o impurezas que puedan dañar a menudo y gravemente las cuchillas, por lo que en general se puede recomendar el **astillado**.

Otra importante opción es el **sistema de aprovechamiento**. En general, en claros de árboles pequeños, para un tamaño de monte que no sea excesivamente pequeño y si existe un lugar que se puede emplear para el cargadero de árboles y, en su caso, el astillado de los mismos, se opta por el **sistema de árboles completos seguido de su astillado fijo**.

Otras opciones menos empleadas serían el sistema de astillas o de astillado móvil, en que la astilladora móvil –sobre autocargador– astillaría los árboles en el propio monte y sacaría las astillas al cargadero, directamente o a través de un vehículo con remolque con contenedor de astillas que se suele conocer como “lanzadera”, y el sistema de aprovechamiento de “madera corta”, en que tras el apeo se lleva a cabo el procesado manual o mecanizado, extrayéndose con autocargador las trozas y dejándose en el monte las hojas, puntas y ramas.

Como se ha indicado, el sistema de astillado móvil está en regresión en los países nórdicos –según Kärhä (2007), el parque de astilladoras móviles sobre el terreno en Finlandia es de sólo una sobre un total de 78 muestreadas en 2007, frente a las astilladoras o trituradoras remolcadas sobre camión, astilladoras acopladas sobre tractor o sistemas integrados de camión y astilladora, todos ellos para trabajar en fijo (en cargadero) que serían los restantes 77–.

El sistema de madera corta, habitual para leñas, no es usado con tanta frecuencia para un aprovechamiento integral de biomasa, por lo que se ha optado para los ensayos y para su desarrollo en el presente manual por el sistema de árboles completos. No obstante, el sistema de madera corta tiene la ventaja de que existe tradición de su uso, se emplean los mismos medios que para la madera y permite destinar la producción a diferentes destinos en función del mercado, por lo que la Junta de Castilla y León está promoviendo en la actualidad (2009) que el equipo redactor del presente Manual realice experiencias sobre los mismos.

5.4.3. Preparación y dimensionamiento de los cargaderos

Los cargaderos en el aprovechamiento integral de la biomasa deben ser relativamente grandes, al tener que servir para permitir la descarga de árboles completos por parte del autocargador, almacenar esa pila, la carga directa de camiones o el astillado y carga de camión, además de tener espacio para el depósito de contenedores o para pilas de astillas, así como para el movimiento con palas cargadoras si es necesario.

Las características de los cargaderos son las siguientes:

- Deben tener buena capacidad portante, dado que una astilladora puede llegar a pesar más de 30 t, mientras que un camión de piso móvil puede superar las 40 t en carga. Su superficie debe ser llana y se debe evitar a toda costa la presencia de rocas.
- Los cargaderos deben colocarse en lugares donde puedan acceder camiones con tracción ordinaria. En caso de no existir tales lugares, deberían planificarse los medios para que pudiesen entrar y salir sin dificultad: se puede aportar astillas a la superficie para casos no muy graves o bien añadir grava sobre la misma. Otra opción es pla-

El aprovechamiento integral de biomasa en los resalveos de montes bajos de Rebollo

near o aprovechar la presencia de un vehículo auxiliar para cablear los camiones y facilitar su salida (*Figura 85*). Si se producen daños en el cargadero, se debe pensar en los medios para su reparación.



Fig. 84 y 85: Problemas operativos de transporte en tiempo lluvioso.

- Cuando las condiciones de las pistas puedan ser deslizantes, no conviene situar los cargaderos en la parte baja de una larga cuesta arriba, porque un camión cargado necesita cierto espacio para acelerar antes de afrontar una subida
- El cargadero debe tener una dimensión suficiente para tener espacio para la pila –que conviene que sea grande, al menos lo mínimo para una carga completa de camión– y para operar simultáneamente con la astilladora y uno o dos camiones. Para dimensionar el cargadero, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - El cargadero debe estar diseñado para que en la pila puedan apilarse los árboles enteros, por lo tanto, con una anchura disponible igual o mayor a la altura máxima de los árboles, y con un espacio suficiente para que la maquinaria de astillado se posicione, y junto a ella el medio de transporte elegido.
 - La longitud del cargadero debe ser suficiente. Una astilladora fija sobre camión ocupa desde 10 a más de 12 m, un semiremolque o *trailer* con piso móvil o un camión con remolque de contenedores pueden superar los 18 m.
 - Las pilas deben disponerse de modo que toda su anchura quede al alcance de la grúa de la astilladora, en ningún caso en la proximidad de líneas eléctricas y con su lado más próximo a la pista o carretera situado como máximo a 5 ó 6 metros del borde de la misma.
 - En todo caso, las características técnicas de la astilladora determinan a qué lado de la pista o carretera se deben hacer las pilas de árboles o si se pueden hacer a ambos lados: De la misma manera, la alimentación de la astilladora debe ser tenida en cuenta, esto es, si carga lateralmente o por la trasera, o si se trata de una trituradora de carga superior. En estos dos últimos casos, la pila o pilas pueden colocarse en ambos lados de la carretera o pista.
 - A este respecto, hay que conocer *a priori* el sistema de alimentación de la astilladora a emplear (como se muestra en la *Figura 86*, si la alimentación de la astilladora es lateral, y debe cargar un camión situado a su costado, su anchura en operación será de 4 o 5 metros y necesitará junto con el camión un total de 7 a 8 me-

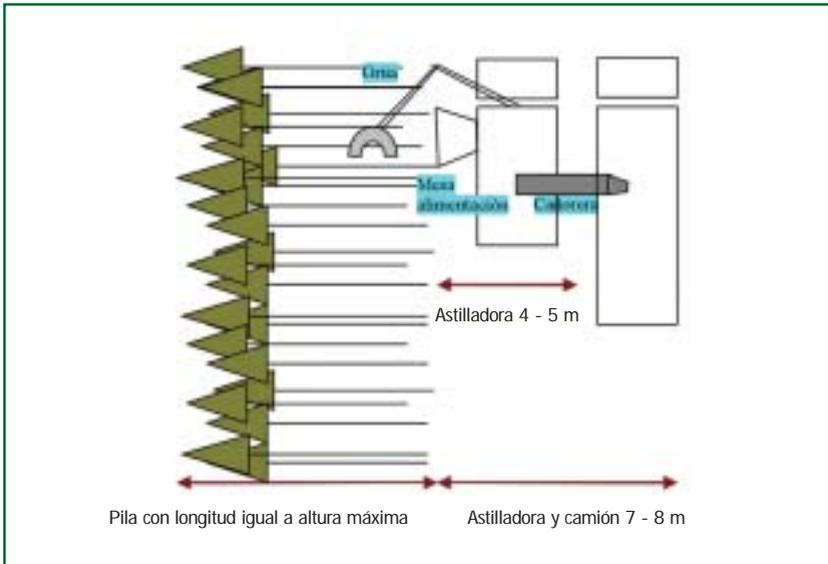


Fig. 86: Características de los cargaderos.

tros adicionales a los de la propia pila –Kallio y Leinonen, 2005–). Si se trabaja con astilladora sobre chasis de autocargador, puede trabajar desde el otro lado de la pila (en el interior de la masa), aunque no esté habilitado como cargadero –no sea perfectamente llano o tenga escaso poder portante–, lo que reduce las necesidades de espacio.

- También es conveniente tener en cuenta hacia dónde envía la cañonera de la astilladora o trituradora el material procesado, si hacia delante, hacia atrás o hacia los lados. Es recomendable que los camiones giren cuando estén vacíos y se coloquen en la dirección del transporte a planta antes de su carga, para evitar maniobras a plena carga (Alakangas *et al*, 1999).
- Se puede reducir la necesidad de espacio cargando con el camión en la pista o carretera. Esto requiere señalizar adecuadamente las operaciones, cumpliendo todas las normas de tráfico si se trata de una vía pública, y suficientemente en el caso de una pista particular o que se pueda cerrar, debiendo informar a los potenciales usuarios y señalizar a distancia y con claridad suficiente de las operaciones de carga en cualquier caso.
- En el monte de Los Corrales, la pila se colocó el cargadero en una finca de acopio de pienso. Esta finca se caracteriza por un piso relativamente firme y una suave pendiente. En el otro monte (Valsemana), se hizo un apilado en altura, alcanzando mayor volumen de biomasa en menor superficie, como se aprecia en la *Figura 88*.

Si se cruza el rendimiento de la astilladora y el del autocargador descargando sobre la pila, con las superficies y volúmenes necesarios para la pila en función de la altura de ésta, como aparece en la *Tabla VI*, se observa que la opción de apilado a más altura disminuye tanto el rendimiento del autocargador en la operación de descarga como el rendimiento de la

El aprovechamiento integral de biomasa en los resalveos de montes bajos de Rebollo

astilladora, a cambio de necesitarse una menor superficie para la pila de árboles. Para tomar una decisión óptima habría que buscar un compromiso entre ambas opciones, teniendo en cuenta la disponibilidad de espacio. El cargadero, en ambos montes, era lo suficientemente ancho para situar la astilladora y el camión en paralelo (*Figuras 87 y 88*).

	CORRALES	VALSEMANA
Altura media de pila (m)	2	3.5
Superficie pila (m ² /t)	5.8	2.6
Volumen pila (m ³ /t)	11	9
Volumen astilla (m ³ aparentes) / Volumen pila (m ³ aparentes de árboles completos)	0.21	0.27
Rendimiento autocargador en descarga (t/h)	115	66
Rendimiento astilladora (t/h)	19,68	18,33

Tabla VI: Comparativa de apilado y rendimientos entre Valsemana y Corrales.

	CORRALES	VALSEMANA
Longitud media	25 m	22.5 m
Longitud máxima	36.5 m	27.5 m
Anchura media	12 m	11 m
Anchura máxima	15.5 m	13.5 m
Altura media	2 m	3.5 m
Altura máxima	2.5 m	4.1 m
Superficie	15.5 m x 36.5 m= 565.75 m ²	13.5 m x 27.5 m= 371.25 m ²
Volumen aparente pila	600 m ³	866.25 m ³
Peso de astillas	51,79 t	95,25 t
Volumen aparente de astillas	128 m ³	238 m ³
Número de árboles (estimación del inventario posterior)	2082	2912
Número de pies (coz) por m ² de pila	28,43	18,33

Tabla VII: Características dimensionales de las pilas en Corrales y Valsemana

De las experiencias realizadas se estimaron los siguientes parámetros:
 Densidad de los árboles completos cargados en la caja del autocargador = 89 kg/metro cúbico aparente¹
 Densidad media de la astilla verde = 401 kg/metro cúbico aparente

¹ Para cargas en camión de biomasa verde, las referencias escandinavas son de unos 150 kg/metro cúbico aparente, pero cabe indicar que, en el autocargador, el volumen aparente de la parte posterior de la carga constituye un voladizo no apoyado sobresaliendo de la cama del remolque, constituido por las puntas de los árboles, es decir, por ramas finas y follaje, lo que provoca un índice de apilado menor.



Fig. 87 y 88: Apilado del árbol entero en Corrales (izquierda) y en Valsemana (derecha).

5.4.4. Elección de medio de transporte

El acceso a los montes puede paralizar un trabajo forestal. Se debe tener en cuenta el firme de las pistas, su anchura, la pendiente y los radios de giro, así como la presencia de puentes u otros obstáculos que supongan limitaciones de gálibo. En montes con dificultad de acceso –casi todos–, los camiones deben ser apropiados para circular por caminos forestales. En el caso de estudio, algún conductor fue muy reticente a sacar los camiones de la pista forestal o incluso a circular por ella.

Otro aspecto fundamental para la circulación por las pistas forestales es la coordinación con los demás usuarios. Se debe recorrer la zona para encontrar los otros posibles usuarios y coordinar los usos simultáneos de la pista, especialmente si es estrecha y/o se ocupa su explanada por vehículos parados.

Las principales opciones para el transporte de astillas son las siguientes:

- Los **camiones rígidos** empleados normalmente para transporte de áridos (“bañeras”) tienen mayor capacidad de desplazarse en montes de peores condiciones de acceso, aunque en absoluto son todo-terreno. Pueden emplearse de dos formas:
 - En espera a ser cargados por la astilladora. Este sistema tiene alto riesgo de quedar parado fácilmente. Si el camión se retrasa, se atasca, la astilladora no puede trabajar, puesto que no tiene sistema de acumulación de astillas (*Figura 89*).



Fig. 89 y 90: Carga en “bañera” y en contenedores.

El aprovechamiento integral de biomasa en los resalveos de montes bajos de Rebollo

- Astillado al suelo y recogida con pala cargadora o cargadora telescópica auxiliar. - Esta forma de trabajo permite trabajar a la astilladora a pleno rendimiento, pero el sistema incorpora un nuevo elemento, la pala cargadora, y supone una fuente adicional de impurezas. Se debería evaluar la disponibilidad de camiones, la calidad de la astilla demandada, los posibles costes de mantenimiento incrementados y el precio horario de la pala cargadora (*Figura 91*). En general, es preferible garantizar una buena logística.
- La segunda opción de transporte es el uso de **contenedores y camiones multilift**. Esta opción dota al sistema de mayor flexibilidad, aunque se requiere una diferente organización de los cargaderos, pudiendo ser necesario que la astilladora se tenga que desplazar durante el astillado con mayor frecuencia (*Figura 90*). Además, los transportistas de contenedores rara vez tienen costumbre de trabajo forestal en España, lo que puede ser fuente de conflictos.

La carga y descarga de los contenedores puede ser problemática si el suelo no es firme y está mojado por la lluvia. El otro inconveniente es que una vez depositados los contenedores en el suelo estos quedan fijos y aunque la boca de salida del material astillado es orientable, se puede perder parte del material si la distancia entre el contenedor y la salida de astillas es grande.



Fig. 91: Pala auxiliar necesaria si se descarga en suelo.



Fig. 92: Contenedores de carga lateral.

Una opción para mejorar las operaciones, especialmente si el espacio de cargadero es pequeño, y muy especialmente para esquemas de astillado móvil, es emplear contenedores de carga lateral, que pueden ser depositados en borde de pista y manejados desde la misma, dado que no necesitan ser cargados desde el frente como los contenedores más comunes (*Figura 92*).

- Más aún que el camión *multilift* con remolque, el transporte y manejo de astillas se optimiza —especialmente a largas distancias— con **camiones semirremolques o trailers de piso móvil** de alta capacidad (de 85 – 90 metros cúbicos aparentes, cerrados). Suelen requerir una pala elevadora auxiliar para ser cargados de astilla, lo que

suele obligar a depositar las astillas en el suelo y después cargarlas, con los inconvenientes que ya se han citado. El problema de estos vehículos de gran capacidad es su movilidad en monte, por su amplio radio de giro y escasa adherencia en vacío (*Figura 93*).

En todo caso, transportar la astilla cubierta con un toldo (que es obligatorio), para evitar que pueda esparcirse por caminos, carreteras..., y en caso de lluvia, evita que se moje y que aumente su peso con el riesgo de superar la tara permitida del camión (*Figura 94*).



Fig. 93 y 94: Piso móvil y protección con lona.

Transportar astilla verde con la densidad por metro cúbico aparente estimada en este estudio conduce rápidamente al exceso de los pesos máximos autorizados. El transporte, especialmente para largas distancias con vehículos tipo “piso móvil” podría optimizarse evitando el falso flete (carga del camión por debajo de su volumen máximo) mediante carrozados en aluminio.

De acuerdo con González (1987) es conveniente que el mismo contratista que se encargue del astillado sea el responsable del transporte de astillas, lo que reduce los problemas logísticos.

En cuanto a los costes de transporte de la biomasa, según se decida transportarla sin elaborar o una vez astillada y el medio de transporte, se van a estimar para las siguientes opciones principales:

- para la biomasa bruta, considerando la carga directa de la misma en camiones, y
- para la astilla, considerando su astillado y la posterior carga de la astilla.

Se supondrá que todo ello se produce de forma inmediata a la corta, para no complicar los cálculos. En la práctica, cabe también considerar la posibilidad de dejar que los árboles y/o la propia astilla se sequen durante su almacenamiento en el cargadero. Con ello, aunque se reduzca el peso de biomasa y, por ello, se aumenten los costes de su transporte en términos unitarios, también se incrementa notablemente su poder calorífico, con lo que se pueden obtener mayores remuneraciones por el consumidor.

Sin tener en cuenta esta posibilidad, que se estima complicada en muchos casos por el incremento en los riesgos de incendios y/o plagas, se presenta un primer estudio de costes de la elaboración inmediata y el transporte de biomasa verde, valorando las siguientes posibilidades:

- 1.- **Transportar los árboles completos** directamente al centro de consumo, **empleando el mismo autocargador** que los extrae del monte (capacidad de carga de 33 metros cúbicos aparentes, que equivalen a unas 5 t de biomasa).
- 2.- **Transportar los árboles completos** utilizando un **camión de caja rígida**, cerrada y equipada con grúa. Este tipo de camión puede acceder sin problema si trabajamos en montes de acceso complicado (capacidad de carga de 50 metros cúbicos aparentes, que equivalen a 7,5 toneladas en verde).
- 3.- **Transportar los árboles completos en un camión semi-remolque cerrado** (tipo *trailer*) de 70 metros cúbicos aparentes de capacidad. Este tipo de camión podría acceder a montes sin malas condiciones de acceso e incluso, dependiendo de la experiencia del transportista, a montes con condiciones de acceso regulares.
- 4.- **Astillado “fijo” en cargadero y transporte en camión de caja rígida cerrado** –o camión *multilift*–. Sería lo propio de montes con condiciones malas de acceso, aunque el camión *multilift* puede encontrarse con problemas en el manejo de los contenedores en tiempo húmedo, por lo que en principio se supondrá un camión de caja rígida (carga total, para 50 metros cúbicos aparentes, de 20 t).
- 5.- **Astillado “fijo” en cargadero y transporte en camión de piso móvil** de 88 metros cúbicos aparentes. En el presente caso, se obtiene un peso de carga de 35,2 toneladas, con lo que se superaría la carga máxima autorizada. Aunque se podría emplear si se dejara secar la astilla, se supondrá que, para los presentes cálculos, se utiliza un *trailer* (semirremolque) cerrado de 70 estéreos, que hará un peso de carga de 28 t, lo que en ausencia de grúa permitiría respetar los máximos legales.

Así pues, se comparan los esquemas de costes para montes de acceso complicado –en que las alternativas serían el autocargador y el camión de caja rígida– sea para transportar biomasa bruta o astillas con montes con condiciones de acceso buenas o intermedias, en que

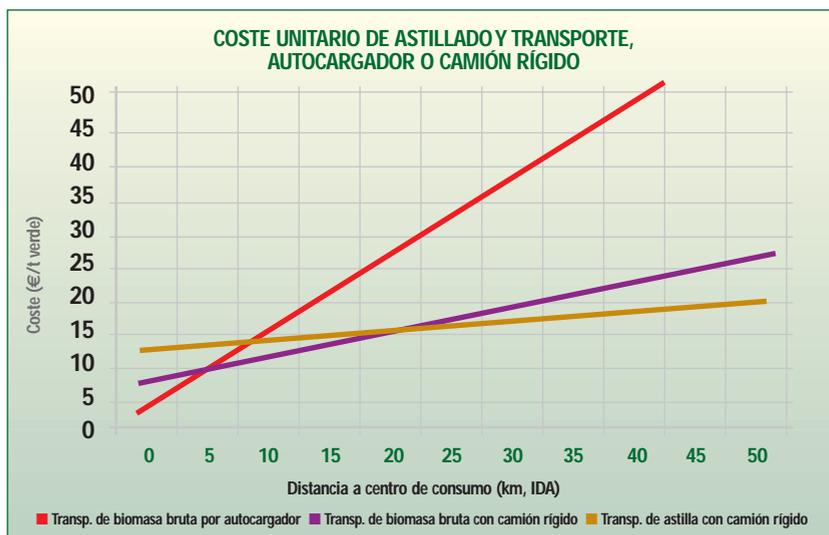


Fig. 95: Costes de astillado y transporte, montes de acceso difícil.

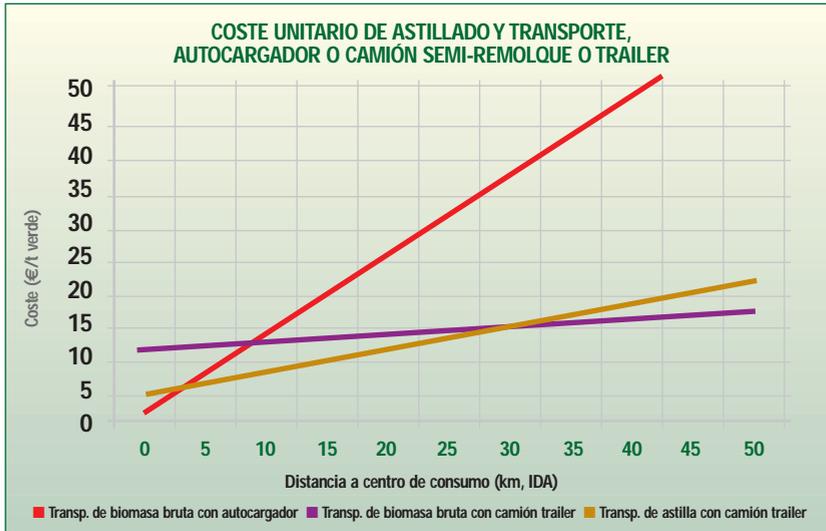


Fig. 96: Costes de astillado y transporte, montes de acceso fácil o medio.

se supone que se podrán emplear trailers para los transportes. Los resultados de dichas comparaciones se muestran en las Figuras 95 y 96.

Como se aprecia en las mismas, el transporte utilizando el propio tractor autocargador de desbosque sólo es la alternativa más rentable los 5 primeros kilómetros si se lleva a cabo el transporte alternativo de árboles completos con camión de caja rígida, reduciéndose a 4 cuando se usa un camión *trailer*. Esto indica que el propio autocargador podría interesar para transportar biomasa a cada Centro Logístico sólo desde montes muy cercanos.

A partir de esta distancia, empiezan a hacerse rentable los camiones transportando biomasa bruta (árboles). Siempre es más económico el transporte mediante semirremolques (“trailers”), en montes que permitan su uso, comenzando a ser más rentable el astillado y transporte de astilla a partir de los 27 km. En el caso de montes en que se deba emplear camiones rígidos –de malas condiciones de acceso– la distancia límite al centro de consumo en que empieza a interesar el astillado es de 22 km.

Hay que insistir en que estas alternativas sólo se presentan si el consumidor puede adquirir biomasa bruta, lo que corresponde a consumidores de gran tamaño. Estos consumidores pueden incluso preferir adquirir biomasa en bruto, para controlar ellos el proceso y la calidad del astillado.

5.5. Recomendaciones de ejecución. Rendimientos, valores, observados y referencias

5.5.1. Apeo y apilado o amontonado de biomasa

- **La multitaladora** es una taladora–apiladora con capacidad de acumular varios árboles ya cortados mientras se procede al apeo de otros, de tal modo que se apilan varios árboles de forma conjunta. **Es el medio de más rápida expansión en Es-**

candinavia para el apeo de árboles completos de pequeñas dimensiones (unos 10 a 15 cm) con fines energéticos. No obstante, su rentabilidad se ve muy afectada por el tamaño pequeño de los pies, por lo que para árboles de muy pequeño tamaño es más usual allí el apeo con motosierra, usando accesorios de manejo que permiten al operario trabajar sin agacharse (*Fig. 73, al principio del capítulo*).

- La multitaladora debe ajustarse en tamaño y dimensiones al trabajo. En general, las máquinas base para esta función no tienen una gran demanda de potencia, (<100kW ó 140 CV), dado el poco peso que deben manejar y la reducida potencia hidráulica que requieren, al no necesitar sistema de alimentación para desramar. Es normal en los países nórdicos usar máquinas pequeñas de segunda mano.
- En España, especialmente si el tamaño de los robles superase a menudo los 15 cm de diámetro, y si la empresa que planea ejecutar el aprovechamiento corta también en entresacas convencionales de pino, puede ser más interesante usar una cosechadora convencional, existiendo también la posibilidad de adaptar un “kit” para permitir la función de acumulación de árboles.
- Si se emplea para cortas en los rebollares un cabezal con sierra de cadena (en los países nórdicos lo habitual es usar cuchilla, más segura en montes bajos y con menor frecuencia de mantenimiento), la cadena de corte y la presión del espadín se debe ajustar según el tipo de madera a apearse. La madera de rebollo es dura, por lo que hay que rebajar la presión de corte. La cadena y el espadín deben estar en óptimas condiciones para un buen rendimiento.

A continuación se enumeran recomendaciones sobre la forma de trabajo con estas máquinas.

- Es fundamental el **comportamiento cuidadoso de los maquinistas** de la procesadora y del autocargador en las operaciones de manejo de los árboles con las grúas, para **evitar daños en la masa remanente**. Éstos pueden ser muy reducidos si se procede correctamente.
- Cuando se use una **multitaladora**, se debe intentar **apear los máximos árboles por ciclo** (antes de formar una pila y depositarlos en el suelo) para rentabilizar el diseño tecnológico del cabezal. Para los escandinavos, lo ideal es entre 5 y 10. Además, conviene cortar más de un pie en cada operación de apeo, para lo que es conveniente que el cabezal sea de cuchilla (*Figura 97, a y b*).
- Los **rebollos secos, dominados y en estado descompuesto no deberían cortarse**, dado que suelen romperse, al contactar con el cabezal, en fragmentos que luego no se recogen por el autocargador.
- **Los pies de elevada altura (más de 8 ó 10 metros) se deben tronzar en dos piezas** para facilitar su posterior carga en el remolque del autocargador.
- La cosechadora debe dejar las **pilas de árboles lo más ordenadas posibles**, con la coz hacia las calles y enrasadas. En situaciones como la convergencia de dos calles, se debe procurar no mezclar unas pilas con otras.
- El rendimiento medio observado para una procesadora convencional *Timberjack* adaptada mediante un *kit* a la función multitaladora en las experiencias de León fue de 3,7 toneladas verdes de biomasa por hora de trabajo (3,0 por hora de presencia). La va-



Fig. 97, a y b: Cabezales multiárbol de fabricación nórdica

riación de los rendimientos se explicó por el factor principal de los diámetros de los árboles extraídos, según se muestra en la Figura 98.

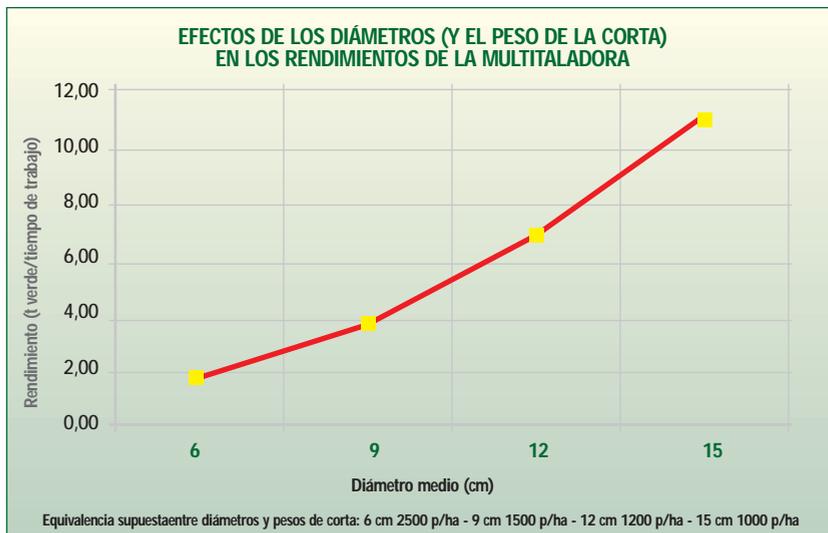


Fig.98: Variación de rendimientos en las experiencias de León

En las experiencias escandinavas con multitaladoras de cuchillas, también se registra la gran importancia del tamaño de los árboles y el número de ellos a cortar por hectárea sobre los rendimientos, como se recoge en el gráfico de la Figura 99.

Las cifras son comparables a las obtenidas en las experiencias de los rebollares leoneses, bajo similares hipótesis en cuanto a la correlación de los diámetros con el número de pies cortados por hectárea, lo que sugiere que estas fuentes se podrían emplear como referencia. No obstante, el equipo redactor de este manual piensa que con una multitaladora de cuchillas específicamente diseñada para cortar árboles completos para biomasa, se podría mejorar bastante los rendimientos registrados en León y, por tanto, los señalados en estas referencias.

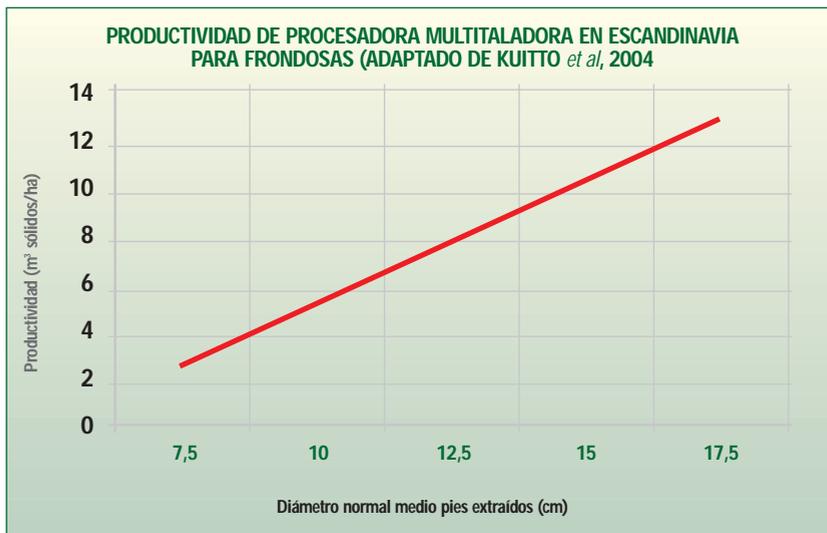


Fig. 99: Rendimientos de multitaladora según fuentes escandinavas.

5.5.2. Extracción de la biomasa

- **El autocargador es preferible al skidder para la saca de árboles completos** para energía, no sólo por razones selvícolas y ambientales, sino para evitar impurezas que dañen las cuchillas de las astilladoras y perjudiquen la calidad de la astilla.
- **El autocargador debe tener la máxima capacidad posible**, puesto que al recoger los árboles enteros el peso no es el factor limitante, sino el volumen de la caja, siempre y cuando la anchura de la calle que ha abierto la procesadora permita el paso del remolque sin que la masa remanente sufra daños.
- Hay sistemas para ensanchar la carga, mediante teleros extensibles hidráulicamente o suplementos que alargan la “cama” del remolque (largueros adicionales en la trasera o en los laterales). Este tipo de soluciones técnicas pueden dificultar el funcionamiento en cortas parciales en que las calles deben no ser excesivamente anchas. También hay sistemas compresores, normalmente en autocargadores con paneles laterales macizos accionados por dos o tres potentes cilindros hidráulicos por cada lado. Estos sistemas se recomiendan más para residuos sueltos que para árboles completos –aunque se pueden utilizar en éstos, sobre todo en la modalidad de garras compresoras hidráulicas, duplicando la capacidad de transporte de los tractores agrícolas con remolque–. Normalmente se emplean por empresas que utilizan el autocargador más de 6 meses seguidos al año para saca de restos, pues deben desmontarse para su uso en desembosque de madera.
- El brazo de la grúa debe ser lo más largo posible, y con **una pinza que tenga mayor capacidad** que las que utilizan habitualmente para manejar la madera. No obstante, para árboles completos no son recomendables las pinzas tipo “pulpo” (con cuatro o más puntas triangulares que se juntan al cerrarse la pinza) o las pinzas anchas a las que se quitan los travesaños y se refuerzan las puntas, tan útiles para trabajar con restos, porque sí que interesa propiciar que la carga esté alineada para su disposición longitudinal en el remolque.

- Como ya se ha indicado en las recomendaciones de apeo, los pies de elevada altura se deben tronzar en dos piezas por la cosechadora para facilitar su manejo. En caso contrario (o si el cabezal no está diseñado para hacer esta función) se puede dotar a la grapa de la grúa del autocargador de una espada de corte para esta función.

A continuación se enumeran recomendaciones sobre la forma de trabajo con autocargador:

- Es muy importante **maniobrar cuidadosamente** con los árboles al cargar de la pila al remolque, para evitar daños sobre la masa remanente, que pueden ser de especial gravedad durante el periodo vegetativo.
- En la carga, especialmente si se aprecia o se sospecha la presencia de piedras, es importante **sacudir el fajo de pies con la pinza para propiciar que las piedras se desprendan**.
- Para garantizar el cuidado en estas operaciones, lo ideal es que **la empresa que se encargue del desembosque de los árboles completos sea la misma que efectúe el astillado**.
- Si se aprecia o sospecha la existencia de piedras, puede convenir sacudir puntualmente la carga con la grúa también en las operaciones de descarga.
- **No tiene sentido intentar recuperar el 100% del material apilado**, incluyendo fragmentos desprendidos, árboles muy pequeños, etc. Es mejor dejar algo de restos en el terreno que perder productividad global y aumentar las impurezas en el material. No obstante, **en el sistema de árboles completos, se recoge un elevado porcentaje de la biomasa producida: en la experiencia estudiada en León, el porcentaje de aprovechamiento, estudiado pesando después del aprovechamiento los restos que quedaron en el terreno, fue del 97,3%**.
- En todo caso, **los árboles se deben cargar en el remolque paralelamente a su eje longitudinal y con la coz hacia la delantera del autocargador**.
- **El apilado de los pies en la pila de cargadero se debe hacer para que la coz del árbol siempre esté situada en el lado en el que se colocará la máquina astilladora (Figuras 100 y 105)**. Todos los pies deben estar en la misma disposición. Al contrario que en el caso de los residuos, **lo mejor es que el autocargador se coloque paralelamente a la pila para la descarga**.
- **En la base de la pila debe haber colocados transversalmente al resto unos árboles para facilitar la carga con pinza de la astilladora y evitar así el arrastre de piedras y tierra, elementos que deterioran las cuchillas (Figura 100)**.



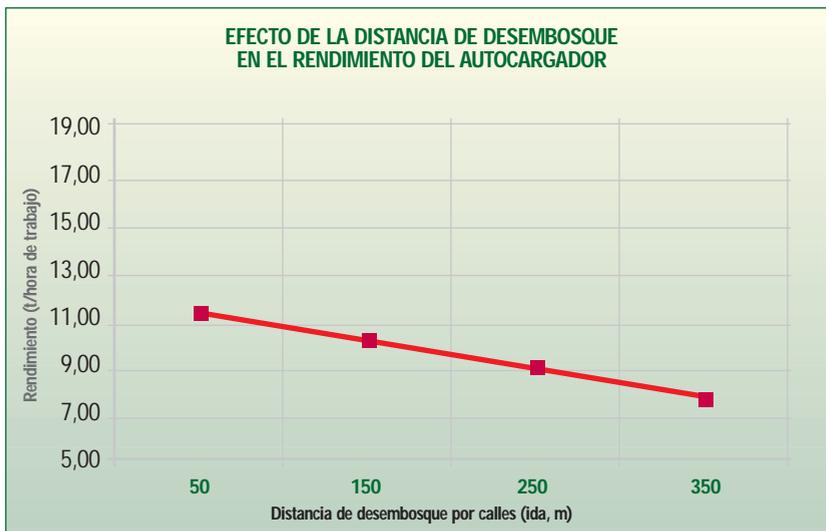
Fig.100: Forma de disponer una pila de árboles completos de roble.

- **La pila tendrá una altura igual a la de la cabina de la astilladora para optimizar el apilado.** Una altura mayor dificultaría la visión del operario y disminuiría el rendimiento de la máquina más cara del sistema, aunque tiene las ventajas de reducir la proporción de impurezas y dificultar la ganancia en humedad de la biomasa si está seca y llueve persistentemente.

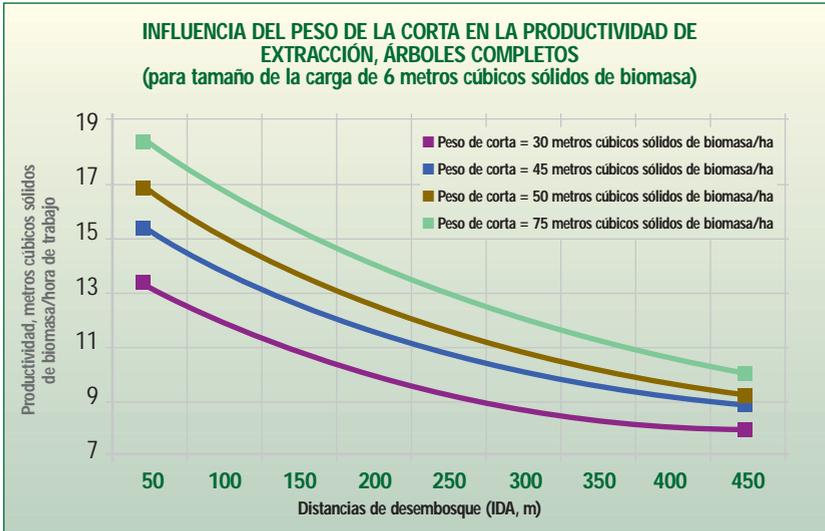
En cuanto a los rendimientos de estas operaciones, en las experiencias de León se registró un valor medio de 11,02 t/hora de trabajo –siempre toneladas verdes–, para una distancia de desembosque media de 150 metros por pista más unos 75 m por calle, y con pendientes medias del 10%.



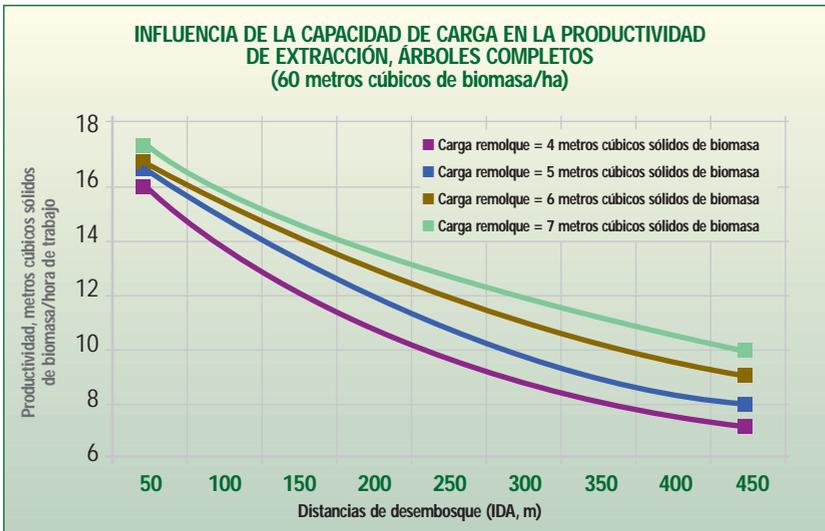
Fig. 101 y 102: Efecto de los diámetros y de la distancia de desembosque en el rendimiento de saca.



La influencia de los principales factores en el rendimiento se representa en las Figuras 101 y 102. En cuanto a los rendimientos en otras fuentes, se representan en las Figuras 103 y 104 unos gráficos de rendimiento en función de la distancia, recogiendo el efecto de la capacidad de carga del remolque y del peso de la corta, respectivamente. Estas gráficas se han construido a partir de las ecuaciones publicadas por Ranta *et al* (2001).



Figuras 103 y 104: Rendimientos de la saca de árboles completos según fuentes nórdicas (Ranta et al, 2001).



En estas Figuras, se aprecia cómo, para una distancia de desembosque de 250 metros, el rendimiento se incrementa en un 25% al pasar de un remolque de 4 a uno de 7 metros cúbicos sólidos de biomasa de capacidad.

De ahí el interés, ya comentado, de los escandinavos en ampliar los remolques de sus autocargadores para poder cargar más biomasa. Análogamente, para la misma distancia de desembosque, la diferencia de rendimiento entre una extracción de 30 y 75 metros cúbicos sólidos por hectárea, es de casi un 30%. Los valores obtenidos en las pruebas de León son similares a los que predicen estas fuentes, por lo que parece que se pueden utilizar como referencia.

Sí resulta interesante comentar que la experiencia castellanoleonesa consiguió **una carga media de aproximadamente 5 metros cúbicos sólidos en un autocargador convencional Timberjack**, capacidad que en Finlandia es la mínima que se considera para el transporte de biomasa bruta.

5.5.3. Elaboración de la biomasa bruta: astillado

- **Las trituradoras sólo son justificables ante la certeza de la existencia de abundantes impurezas** de piedra o arena abrasiva, suelen usarse también con maderas muy duras o con abundante sílice, especialmente si están secas (por ejemplo, el eucalipto en Portugal). El hecho es que son máquinas más pesadas y requieren más potencia y tienen más consumo que las astilladoras, originando además un producto con menor valor añadido.
- **La selección de la tecnología de astillado es de la máxima importancia.** En los países nórdicos, para las operaciones de clareo de árboles completos pequeños, predominan las astilladoras de disco sobre tractor agrícola potente, porque son más baratas, pero su alimentación es demasiado pequeña para trabajar con residuos, luego se trata de máquinas poco polivalentes. En cualquier caso, deben tener **alimentación forzada y un mecanismo de desatascado automático**, que revierta el sentido de giro de los rodillos de alimentación en caso de atasco del mecanismo.
- En el caso de frondosas sin desramar, especialmente con hojas verdes, una pequeña dimensión de la cañonera y/o escasa potencia del ciclón podría originar numerosos atascos en la cañonera, por lo que se debe buscar una máquina con **suficiente caudal y sección en la cañonera de soplado**.
- Las **astilladoras de disco producen una astilla de peor calidad**, con una granulometría más irregular y abundantes astillas alargadas –frecuentemente de más de 10 cm–, debido a la forma tangencial de ataque de las cuchillas a los discos. Frente a ellas, las astilladoras de tambor producen una astilla más fina y homogénea, de buena calidad y además son menos sensibles a las impurezas.
- Para una astilladora montada sobre camión es muy importante que el acceso del cargadero sea el adecuado. Una astilladora sobre autocargador o con tren de rodaje de oruga no tendría ese problema, pero su necesidad de transporte independiente origina problemas logísticos especialmente si se usa en montes pequeños repartidos por un área extensa.
- **Un aspecto vital es la suficiente anchura y longitud de la mesa de alimentación de la astilladora.** Si ésta es insuficiente, el rendimiento decaerá rápidamente porque la grúa se deberá ocupar con frecuencia de resolver problemas en la alimentación empujando a los árboles hasta que estén debidamente enganchados por los rodillos.

- **Los pies de la parte más baja de la pila son los que se astillan más despacio**, porque en cada viaje la grúa carga menos y debe extremar la precaución para no arrastrar piedras. **La altura de apilado óptima es la que llega la base de la cabina de mandos**. Por encima restaría visibilidad y por tanto bajaría el rendimiento (Figura 105).



Fig.105: Altura de pila adecuada para la carga en la astilladora.

En la **experiencia de León** se empleó una **astilladora sobre camión** marca **Pezzolato 900/1000**, equipada con un motor de 400 CV. Su **rendimiento sobre tiempo de trabajo** se evaluó en **15,52 toneladas verdes/hora** de trabajo.

5.6. Aspectos de dimensionamiento de equipos y logística del suministro

- En las circunstancias estudiadas en León se requieren **2,16 procesadoras por cada autocargador**, aunque esto podría cambiar si se utilizase un cabezal más apropiado, estando la equivalencia aproximadamente en 2 procesadoras por autocargador o incluso algo menos.
- En las mismas condiciones, se requiere **un día de astilladora por cada 1,5 días de autocargador** aproximadamente.
- **Para que la astilladora trabaje 8 horas al día, son necesarios 8 contenedores tipo bañera de 45 m³** Si la astilla no se va a transportar muy lejos (menos de 200 km) se puede organizar de manera tal que al camión le de tiempo a pasar dos veces cada jornada por el cargadero, así que en realidad sólo harían falta 4 camiones.
- De acuerdo con Kuitto (1983, en Kallio y Leinonen, 2005), para una producción anual satisfactoria de 65.000 a 75.000 estéreos de astillas, una astilladora de tambor montada en camión como la empleada en estas experiencias requiere un mínimo de tres camiones semi-remolques para una distancia máxima de transporte

de 80 km. Dos camiones serían suficientes si las distancias no superasen los 40 km.

5.7. Recomendaciones relativas a la calidad de la biomasa. Resultado de los análisis en el caso estudiado

La calidad de la biomasa es un factor básico para su precio, que en los países más avanzados conduce a que se pague por su contenido energético (por MWh) y a que se impongan restricciones y penalizaciones –incluso rechazo– si el contenido en arena, en corteza o acículas, según los casos, supera ciertos límites. En algunos casos, la condición se manifiesta en una humedad máxima, a partir de la cual se imponen penalizaciones en el precio, dada la relación entre humedad de la biomasa y capacidad calorífica por unidad de peso (*Figura 106*).

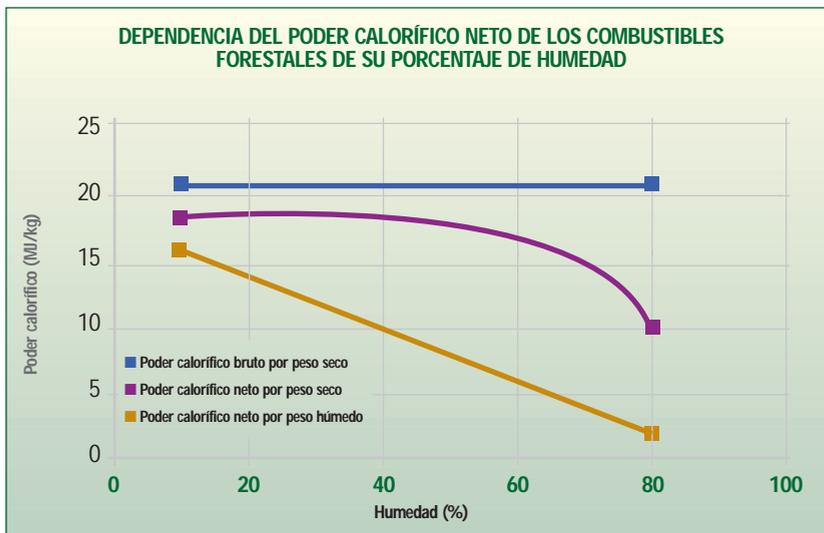


Fig. 106: Dependencia del poder calorífico respecto de la humedad en base húmeda (Hakkila, 2004)

Desde luego, la granulometría es otra condición básica, prefiriéndose en general el astillado al triturado o, más aún, al pretriturado, y valorándose la homogeneidad de la astilla y su tamaño reducido, como se pone de manifiesto en las clasificaciones de calidad escandinavas (en que el factor granulometría da lugar a 4 clases, siendo la mejor aquella en que más del 95% en peso de las partículas es menor de 30 mm, y la peor aquella en que el 95% de las partículas son inferiores en tamaño sólo a 100 mm).

Estas exigencias son máximas en consumidores pequeños, especialmente para aplicaciones térmicas, que no tienen capacidad de almacenamiento copioso y procesado posterior del combustible, y cuyas calderas no son tan adecuadas como las más grandes en lo tocante a los problemas que producen las cenizas o, en particular, los álcalis. Frente a ellos, ciertos grandes consumidores tienen que procesar los materiales recibidos del monte (por ejemplo, para su inyección mixta o alternativa con carbón pulverizado en centrales de cocombustión)

y tienen capacidad de limpieza y separación, o incluso secado, de los combustibles, por lo que pueden aceptar astillas o triturados de peor calidad.

Las principales **normas orientadas a obtener una biomasa de mayor calidad** son las siguientes:

- **No arrastrar o incorporar tierra ni piedras con la biomasa.** En el caso del manejo de árboles completos, como el descrito en el presente capítulo del Manual, la contaminación se puede producir en el apilado, bien porque se incorpore tierra al agarrar los árboles con la pinza del autocargador o al agarrar árboles próximos al suelo de las pilas de cargadero para su astillado. Otra posible fuente sería, en el caso de descargarse astillas en el suelo, la carga de astillas con pala. Las principales medidas en este caso, serían la recogida cuidadosa de árboles por el autocargador, la disposición de árboles perpendiculares a los de la pila de cargadero en la base de la misma, y el procurar la descarga de astilla directa en camión –en caso de no poderse, sería positivo buscar un parque solado o no intentar apurar en la carga de astilla–.
- **Dejar secar biomasa y/o astillas para que el combustible llegue lo más seco posible a su destino,** por el mayor poder calorífico. Ya se ha comentado la conveniencia de dejar secar los árboles por razones ambientales, pero en muchos casos se procura un secado adicional de los árboles extraídos en el cargadero, siempre que esto no suponga riesgos fitosanitarios o de incendios por encima de lo tolerable. En el caso de las frondosas, dejar secar los árboles aumenta su dureza, lo que conlleva mayor desgaste de cuchillas y mayor potencia necesaria –y consumo de combustible–. También se produce más polvo –mayor proporción de finos–, lo que no resulta positivo para la calidad del propio combustible ni tampoco desde el punto de vista ergonómico y ambiental. Hay que buscar un equilibrio, en función del equipo disponible, entre el mayor precio de la biomasa por su mayor poder calorífico por estéreo, y los problemas logísticos y operativos de trabajar con biomasa seca. Entre otros, para el uso adecuado de una astilladora, reduciendo los costes fijos, conviene recurrir a un programa de optimización del transporte en función de la posición de las pilas, el momento de su apeo y desembosque, la época del año y las características de la demanda.
- **En función del destino, el contenido en álcalis y en cenizas en general puede ser perjudicial** y dar lugar a rechazos o penalizaciones. **En principio, a mayor calidad exigida para la biomasa, más conveniente será que no incluya hojas o, en su caso, acículas,** para lo que es también conveniente que se seque en monte. Otra forma de conseguir una biomasa de mejor calidad es aprovechar los montes bajos en invierno, siempre que la fisiografía y accesos lo permitan. Esto también sería positivo desde el punto de vista de la pérdida de nutrientes, aunque es verdad que antes de la caída de las hojas, los árboles recuperan parte de los nutrientes trastocándolos desde las hojas al tronco, ramas y raíces.

Las astillas obtenidas en las experiencias leonesas fueron analizadas por el Laboratorio de Combustibles de la Junta de Castilla y León en León (LARECOM), valorándose **su densidad en 401 kg/estéreo para una humedad del 42% sobre base húmeda. Las cenizas su-**

pusieron un **2,15% sobre base seca**, un valor intermedio en las clasificaciones habituales –no se puede olvidar que se astilló en verde, con hojas–, mientras que el contenido en nitrógeno fue reducido (0,26% sobre base seca).

En los aspectos granulométricos, la astilladora empleada consiguió muy buenos resultados, la astilla se encuentra en la clase mejor de la clasificación finlandesa (el 95% tenía menos de 30 mm de tamaño) y además el porcentaje de finos (partículas de menos de 1 mm) era muy reducido, menor del 1%.

En cuanto al poder calorífico, la astilla es de la mejor calidad considerada en la clasificación finlandesa, con **1,0 MWh por metro cúbico (2,5 MWh/t verde)**. El Poder Calorífico Inferior en base seca fue de 4200 kCal/kg.

5.8. Estimación de costes del suministro de biomasa a partir de resalveos de Rebollares

A partir de los rendimientos medios obtenidos en los resalveos estudiados en León (Montes Valsemana y Los Corrales) y, en su caso, de las tablas o ecuaciones en que se han relacionado los rendimientos con los principales factores que influyen sobre ellos, se ha realizado un análisis de los costes de suministro.

En cuanto a las operaciones estudiadas, se ha evaluado el coste horario de las máquinas adecuadas para los trabajos utilizando métodos estandarizados –Miyata, 1981; FAO, 1992; Tolosana *et al.*, 2004– con un resultado de **63,0 €/hora de trabajo para una cosechadora o procesadora ligera equipada con un cabezal multitalador, 53,6 €/hora de trabajo para un autocargador, y 117 €/hora de trabajo para una astilladora remolcada sobre camión, como la Pezzolato 900-1000** que participó en las experiencias. En dichas estimaciones se ha tenido en consideración las subvenciones que la Junta de Castilla y León otorgaba a la maquinaria para este tipo de trabajos, que eran en 2007 del 40%.

El coste directo final de la biomasa puesta en cargadero en la experiencia estudiada fue de **22,1 €/tonelada verde**, al que habría que sumar **7,3 € por su astillado**. Los costes resultaron más elevados que en las referencias nórdicas, especialmente en el apeo y apilado, lo que se achaca a la falta de adecuación de la máquina empleada, que no disponía de un cabezal multitalador adecuado. Si se suma el coste de transporte –en el presente caso, a unos 100 km–, un 15% de costes indirectos y de estructura y un 12% de beneficio industrial para la empresa suministradora, los costes en la experiencia actual alcanzarían los **54,6 €/tonelada verde (21,9 € por metro cúbico aparente)**.

	Coste directo cosechadora	Coste directo autocargador	Coste directo astilladora	Coste directo total
Valsemana 1	17,36	4,95	7,96	30,27
Valsemana 2	12,94			25,85
Corrales	18,64	4,72	6,09	29,45
Media ponderada	17,21	4,86	7,35	29,42

Tabla VIII: Costes unitarios directos (€/tonelada verde).

No obstante, se considera que los costes de apeo y elaboración se podrían reducir con una máquina más adecuada, y que las distancias de transporte medias para el suministro de una planta consumidora de biomasa no deben llegar a 100 km, sino que deben estar por debajo de 50 km, pudiendo además mejorarse los medios de transporte empleados –bañeras de áridos de capacidad reducida–. Por todo ello, se estima que los **costes estimados podrían reducirse hasta los 40,3 €/tonelada verde (o 16,2 € por metro cúbico aparente)**.

En cualquier caso, estos costes varían si lo hacen las condiciones con respecto a las de los aprovechamientos estudiados. La variable que más influiría es el diámetro medio de los rebollos objeto del tratamiento. Su influencia sobre los costes (observados con la distancia de transporte reducida y con optimización de la maquinaria, respectivamente) se muestra en la *Figura 107*.

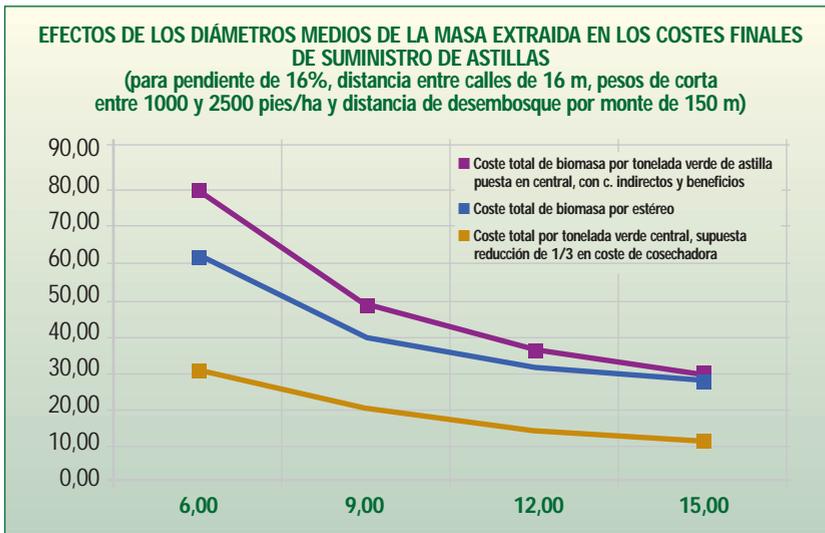


Fig. 107: Efecto de la variación de diámetro de la masa extraída en el coste final, para condiciones similares a las experiencias de León.

Hay que señalar que ni en los costes medios que se han expuesto ni en los que figuran en esa gráfica se incluyen los precios de la biomasa en pie, es decir, lo que recibiría el propietario por el aprovechamiento de la biomasa producida en sus montes. Indudablemente, en el caso de desarrollarse una demanda de biomasa, ello supondría un sobrecoste que se puede valorar, en función de la propia demanda y sus costes de producción y márgenes, entre 3 y 10 €/tonelada verde. A pesar de que ello complicaría aún más el esquema de costes de suministro, la hipótesis de obtención de la biomasa a un coste nulo o muy reducido sólo es plausible mientras la demanda se mantenga muy débil.

5.9. Conclusiones

El **sistema de aprovechamiento** propuesto para el aprovechamiento de biomasa en “entresacas” sobre montes bajos de rebollo u otras quercíneas es el **apeo y apilado de árboles**

completos seguido de su extracción con autocargador o tractor agrícola adaptado con remolque y grúa, y su astillado “fijo” en cargadero.

5.9.1. Respecto a la planificación previa (selección del lugar, dimensionamiento cargadero, etc.)

Una de las principales decisiones se refiere a la conveniencia o no del astillado en cargadero de monte. Esto depende de las características del consumidor final –que puede o no admitir biomasa bruta– o de la capacidad del ejecutor de elaborar la biomasa en una terminal logística. Un estudio teórico muestra que, **en el caso de la astilla verde de rebollo** (densidad estimada de 401 kg por metro cúbico aparente para el 42% de humedad sobre peso húmedo), **el transporte de biomasa bruta es la alternativa más barata hasta los 22 km de distancia del centro de consumo si se emplean camiones rígidos, y hasta los 27 km si se utilizan trailers.**

En la elección de lugar de trabajo, es fundamental la **existencia de cargadero adecuado**, la accesibilidad a los medios de transporte y a la propia astilladora, y el tamaño, para reducir los costes fijos debidos al número de máquinas. Los portugueses consideran un tamaño mínimo de aprovechamiento de 500 toneladas verdes de astilla.

En montes con problemas de acceso o en época invernal, las principales opciones de transporte son los **camiones rígidos de tipo bañera y los camiones *multilift* de contenedores**, estos últimos serían idóneos para evitar descargar las astillas en el suelo. **Si hay poco espacio de cargadero, son útiles los contenedores de carga lateral.**

En montes con cargaderos grandes y buen acceso, o en época de verano, los medios más económicos de transporte de astilla son los **camiones de piso móvil** de alta capacidad, que suelen requerir un medio auxiliar para su carga –cargador telescópico o pala de alto volteo– si la logística no es lo suficientemente buena para permitir ruedas continuas y astillado directo.

En cualquier caso, la astilla se debe transportar cubierta y la astilla verde puede hacer que se superen los pesos máximos. Es muy importante el **dimensionamiento de los cargaderos** en función de los medios de astillado y transporte y de la necesidad de apilado. Para apilar árboles completos, la superficie necesaria se estimó, en los rebollares estudiados, en **4,42 m² por estéreo de astilla (pila de 2 metros de altura) a 1,56 m² por metro cúbico aparente de astilla para pila de 3,5 m de altura.**

En cuanto a la logística de **dimensionamiento de equipos**, en rebollares similares a los leoneses se requerirían **entre 2 y 2,5 procesadoras por cada autocargador, y 1 a 1,5 autocargadores por astilladora**. Cada astilladora necesita aproximadamente **un contenedor de 35-40 metros cúbicos de astilla (o 0,8 a 0,9 camiones bañera de 45 metros cúbicos) por hora efectiva de trabajo.**

5.9.2. Respecto al apeo y elaboración

El medio de apeo idóneo, de acuerdo con las experiencias en otros países, sería, para pies muy pequeños, la motosierra montada en un armazón de aluminio. En condiciones fisiográficas buenas, **para pies algo mayores (8 a 12 cm), se recomienda el uso de máqui-**

nas ligeras con cabezal multitalador. Para pies de mayor tamaño, sería recomendable el uso de cosechadoras (“procesadoras”) convencionales, a las que se puede acoplar algún accesorio para acumular los pies cortados.

En el caso de emplear cabezales multitaladores, la forma de las cepas y la conveniencia de cortar más de un pie cada vez hace más útiles los cabezales de cuchilla que los de sierra. En todo caso, se recomienda depositar en cada ciclo una pila de entre 5 y 10 pies, evitando cortar árboles secos o podridos.

Las pilas deben quedar compactas, separadas y con la coz mirando a las calles, siendo necesario tronzar en dos partes los pies de más de 8 ó 10 m de altura.

Los rendimientos de una procesadora convencional *Timberjack* con un kit acumulador resultaron depender básicamente de los diámetros, entre algo menos de 2 toneladas verdes por hora de trabajo para pies de 6 cm, y algo más de 10 para pies de 15 cm. El valor medio real observado fue de 3,7 toneladas verdes por hora de trabajo para 9,5 cm de diámetro normal medio en una entresaca fuerte. Estos rendimientos son comparables a los obtenidos con multitaladoras según referencias finlandesas.

5.9.3. Respecto a la saca con autocargador

En cuanto al desembosque con autocargador, los principales factores que influyen sobre el rendimiento en montes con pendientes moderadas son la capacidad del propio autocargador y la distancia de desembosque.

Es importante emplear remolques grandes –hay modelos que permiten incrementar el volumen de carga– y grúas de largo alcance. No son necesarias para cargar árboles completos las grúas especiales de biomasa, tipo “pulpo”.

Los pies se deben cargar a lo largo y con la coz por delante. La carga debe ser cuidadosa para evitar daños, y no se debe tratar de recoger el 100% de la biomasa existente, dado que se pierde demasiado tiempo en intentar apurar recogiendo ramas rotas, pies fragmentados, etc., que pueden quedar en el terreno, reduciendo además el riesgo de incorporar piedras o arena.

En la carga y la descarga, si hay riesgo fundado de piedras a arena, se debe sacudir el fajo de árboles con la pinza. Lo ideal es que la empresa que ejecute la saca sea la misma que astillará los pies. La pila de cargadero, si se va a astillar, se dispondrá con la coz mirando hacia la posición de la astilladora, con pies transversales en la base y sin superar en altura la de la cabina de la astilladora.

El rendimiento del desembosque de árboles completos se estimó, en los rebollares estudiados en León, en 11 toneladas verdes por hora de trabajo, par distancias de desembosque de 75 m por calles más 150 por pista, y pendientes reducidas (10%), para una carga media pequeña –5 toneladas por ciclo–, en un autocargador convencional *Timberjack*. Estas cifras son comparables a las obtenidas de referencias escandinavas.

El tamaño de los pies y la distancia de desembosque fueron identificados como los principales factores influyendo sobre el rendimiento. En las referencias escandinavas, se citan como otros factores muy influyentes el peso de la corta (toneladas/hectárea) y la capacidad del remolque del autocargador.

5.9.4. Respecto al apilado de árboles enteros en cargadero

El rendimiento del autocargador disminuye en la operación de descarga cuando se apila en alturas por encima de 2,5 m, de igual manera que el de la astilladora.

La superficie necesaria de cargadero es entre 2,5 y 5,8 m² por tonelada según se apile o no en altura. Es decir, para extraer 100 t es necesaria una superficie mínima de 250 m².

- El coeficiente de apilado de árbol entero en pilas de cargadero es entre 9 y 11 m³/tonelada verde.
- La relación volumen de astilla (m³ aparentes) / volumen de pila de árboles completos (estéreos) está entre 0,21 y 0,28.

5.9.5. Respecto al astillado en cargadero

Si se opta por la elaboración de la biomasa en cargadero, dado el riesgo reducido de presencia de piedras en la saca cuidadosa de árboles completos con autocargador, **se recomienda el astillado con astilladoras de cuchillas sobre tambor, con potencias elevadas.**

En principio, para montes de cierto tamaño, **el esquema más económico es el de astillado fijo** (en cargadero) usando una astilladora con motor propio sobre camión, si bien eso requiere un cargadero de dimensiones suficientes.

En la experiencia estudiada, con una astilladora Pezzolato 900/1000, se obtuvo un **rendimiento de 14,9 toneladas verdes astilladas por hora de trabajo efectivo**, siendo los principales problemas de logística en relación con el transporte y con el estado de la superficie de los cargaderos en tiempo húmedo.

5.9.6. Respecto a los condicionantes medioambientales

Por razones medioambientales –extracción de nutrientes y pérdidas de fertilidad–, se considera conveniente **dejar secar la biomasa en monte antes de su extracción y/o realizar los aprovechamientos de biomasa en montes bajos de frondosas preferentemente en invierno.**

En montes con suelos muy ácidos de texturas arenosas o arenoso-limosas, no se debe extraer toda la biomasa de los árboles salvo que se fertilice adecuadamente a continuación.

En suelos ácidos sobre texturas arenosas a francas, no se recomienda repetir las intervenciones de extracción de biomasa cada menos de 30 años, salvo fertilización posterior.

En suelos neutros o básicos, a menudo con texturas equilibradas a arcillosas, se puede adoptar una frecuencia de extracción de biomasa en montes bajos de entre 15 o 20 años.

Hay que **tomar precauciones, en todo caso, para reducir la erosión**, especialmente en terrenos pendientes, **y para minimizar los daños a los árboles que quedan en pie.**

5.9.7. Respecto a la seguridad y salud

Además, hay una importante serie de **normas** para garantizar la seguridad y salud en los trabajos de recolección de biomasa, que **deben ser conocidas y respetadas por las em-**

presas y los trabajadores de estos trabajos. En el capítulo correspondiente de este manual, se recogen las normas aplicables a las diferentes máquinas y operaciones de aprovechamiento de biomasa en montes bajos.

5.9.8. Respecto a la calidad de la astilla

La calidad de la biomasa (astillas) está relacionada con su granulometría relativamente fina y homogénea, con su humedad lo más reducida posible, con el mínimo porcentaje de impurezas no orgánicas –piedras, arena, piezas metálicas u otras– y con el menor contenido posible de cenizas, y particularmente de álcalis que dan lugar a problemas de sinterización en las calderas.

En ese sentido, los consumidores más exigentes –pequeñas calderas de aplicaciones térmicas–, requerirán astillas con la mayor proporción de madera y menor de corteza, ramillas y hojas, que sea posible. Estas circunstancias pueden condicionar fuertemente la forma de ejecución y la logística de los aprovechamientos.

La astilla obtenida en las experiencias de León fue excelente en cuanto a su granulometría y densidad energética, si bien contenía un porcentaje moderado de cenizas (dado por el hecho de haber sido astillado en verde).

5.9.9. En cuanto a costes del aprovechamiento

Los costes finales estimados para los aprovechamientos mecanizados de biomasa de rebollo en resalveos, para condiciones similares a las estudiadas en montes leoneses pero **para distancias de transporte de menos de 50 km y con una cosechadora multitaladora más adecuada, oscilarían entre 30 y 60 € por tonelada verde de astillas puesta en fábrica (12 y 24 €/estéreo de astilla), en función de que el diámetro medio de la masa extraída oscilase entre 15 y 6 cm, teniendo un valor medio potencial estimado de 38,1 €/tonelada verde de astillas (15,3 € por estéreo) **para un diámetro medio de 10 cm. Estos costes estimados incluyen** los costes directos más **un 15% de costes indirectos y de estructura y un 12 % de beneficios empresariales** de la empresa suministradora, **pero no el precio recibido por la biomasa en pie por el propietario del monte**, por lo que deberían incrementarse en función de la situación del mercado.**

EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESTOS DE CORTA DE CHOPERAS PARA BIOMASA

Este capítulo está basado en estudios sobre experiencias reales de aprovechamientos de biomasa promovidos y coordinados por CESEFOR en montes de Castilla y León, en Villaverde de Mogino (Burgos), Santa Cristina de la Polvorosa (Zamora) y Lobia (Soria). Otra de las experiencias se llevó a cabo en Andalucía, en Santa Fe, en la Vega de Granada. Se hará referencia a los métodos de trabajo, las características de los montes estudiados y los valores de rendimientos y costes observados, aunque también se comparará con referencias de otras fuentes. Las experiencias fueron ejecutadas en octubre y noviembre de 2006, a lo largo de varios meses de 2007 y en enero de 2008.

6.1. Fases de los trabajos, equipos y secuencia de las operaciones

El estudio se ha centrado en la biomasa no maderable procedente de aprovechamientos de madera en choperas. Las choperas son plantaciones a marco real en terrenos cuya pendiente es prácticamente nula. El aprovechamiento maderero de las choperas consiste en la corta a hecho de la plantación cuando llega a su turno. El principal destino de la madera es el desenrollo para tablero contrachapado y tablilla para envase hortofrutícola, seguido del palé y la estaquilla; las ramas y las puntas, que hasta ahora se amontonaban y se quemaban, pueden ser destinadas a usos energéticos.

El aprovechamiento tradicional de las choperas se lleva a cabo por uno o dos motoserristas que apean y desraman los árboles y una pala cargadora frontal o grapa que traslada los fustes, aunque es cada vez más habitual encontrar que estos trabajos se lleven a cabo de manera mecanizada con cosechadora que apea y desrama los árboles, sola o apoyada por un motoserrista. En este tipo de aprovechamiento, como se detallará, se debe contemplar la logística de una manera integral, procurando durante el apeo y desramado de los pies que los restos de corta queden lo más ordenados y limpios que sea posible para su posterior acordado. Un esquema del sistema productivo se presenta en la *Figura 108*.

117

6.2. Evaluación del recurso: importancia y localización en Castilla y León. Tabla de diámetros – pesos de biomasa

De las aproximadamente 100.000 ha de chopo existentes en España en el año 2002, la Comunidad Autónoma de Castilla y León contaba con una superficie de más 60.000 ha (JCyL,

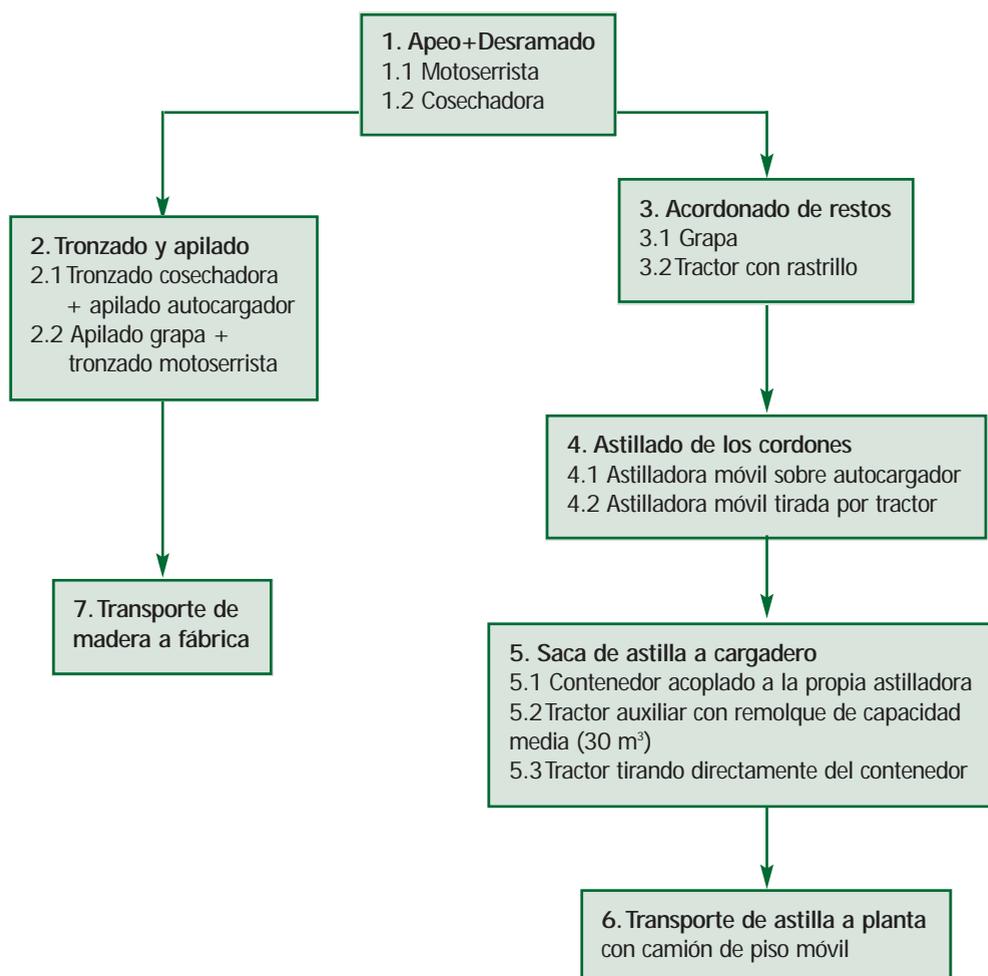
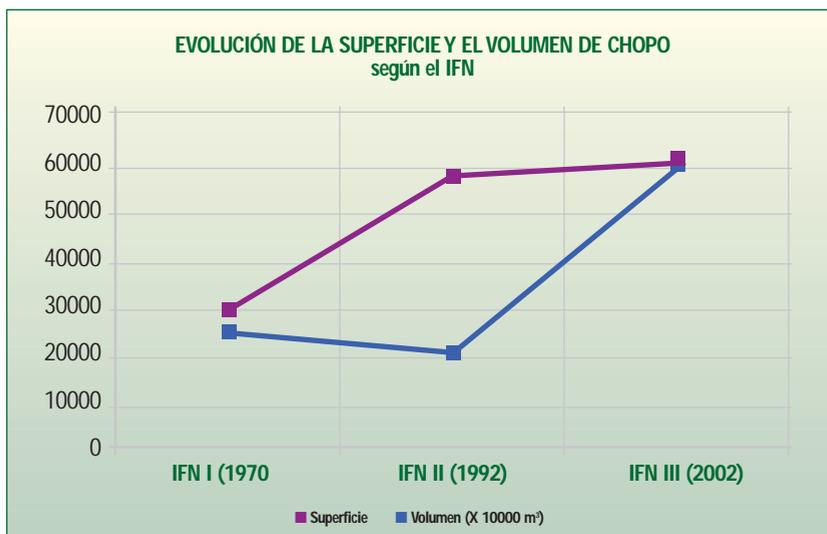


Fig. 108: Esquema de trabajo en el aprovechamiento de chopera. A la izquierda, se señala la línea de trabajo para la madera, a la derecha la línea estudiada para biomasa, con sus variantes.

PROVINCIA	SUPERFICIE (ha)
Ávila	0
Burgos	7.532
León	25.465
Palencia	8.141
Salamanca	0
Segovia	6.597
Soria	5.961
Valladolid	0
Zamora	7.823
CASTILLA LEÓN	61.519

Tabla IX a: Distribución de la superficie en choperas en Castilla y León (IFN3, 2002).



	SUPERFICIE (ha)	VOLUMEN (x 10000 m³)
IFN I (1970)	29.188	335,8845
IFN II (1992)	56.355	308,3432
IFB III (2002)	61.519	799,025

Figura 109, Tabla IX b: evolución de la superficie y el volumen de las choperas en Castilla y León (Tercer IFN).

2005). En los últimos años, la superficie de terrenos que se dedican a la plantación de chopos va en aumento, llegando en 2007 a 87.260 ha (Comisión Nacional del Chopo, MAPA 2007). En cuanto a la producción, en 2005 fueron cortados 442.000 m³ c/c. (PROFOR, 2006).

La distribución por provincias de la superficie total de choperas de Castilla y León es la que aparece en la *Tabla IX a*, y la evolución de esta desde el año 1970, por comparación de los Inventarios Forestales Nacionales (IFN) primero, segundo y tercero viene representada en la *Figura 109* y *Tabla IX b* (JCyL, 2005).

La Cuenca del Duero es la que más superficie dedica a las plantaciones de chopos con respecto a la totalidad nacional (Fernández Molowny, 1998), y juega un papel clave a la hora de producir madera de esta especie (más del 50 % de la producción nacional) y para definir su valor en el mercado. En cuanto a la propiedad y a la gestión en Castilla y León, la superficie de titularidad particular o privada supone el 62%, mientras que el 38% restante es de titularidad pública (Entidades Locales, Junta de Castilla y León y Confederación Hidrológica del Duero), de acuerdo con Calleja Sánchez *et al* (2007).

Las choperas productoras de madera de calidad son plantaciones a marco real con un espaciamiento entre 5x5 y 6x6 m (por lo tanto, con una densidad entre 400 y 278 pies/ha).

Durante el aprovechamiento de la chopera, la madera del fuste y de las ramas se tronza y clasifica según los posibles destinos que puedan tener las trozas en función del diámetro y

de las necesidades de suministro. Una clasificación frecuente del destino de la madera en función de su diámetro es la siguiente:

- **Desenrollo:** trozas hasta 20- 22 cm en punta delgada y con longitudes entre 2,60 y 5,20 m (y múltiplos de 1,30 m).
- **Sierra:** también llamado tronquillo, se utiliza principalmente para tablilla de palé, necesita trozas con un diámetro mayor de 14 cm, aproximadamente.
- **Puntal:** diámetros entre 14 y 7 cm, se puede utilizar para madera de desintegración; hace años, era utilizado como leña.
- **Ramera:** ramas y rabeón de diámetros menores de 7 cm, ramillas y hojas.

La fracción que potencialmente puede ser destinada a biomasa con fines energéticos, y en su caso ser astillada, es el puntal más la ramera. La ramera hasta ahora era un residuo en cualquier caso; los restos de corta que no tenían ningún destino industrial y que tras el aprovechamiento se reunían en un montón y se quemaban *in situ*. El puntal sí tiene un posible uso industrial, como madera de desintegración para tablero o como leña, que se procesa bien para venderla como tal o bien para que los vecinos la recojan. Este último destino está en desuso.

El peso de los restos de corta para astillar se ha estimado, a partir de datos de 35 árboles apeados, en las choperas objeto de estudio, en las que se hizo un inventario previo al aprovechamiento, abarcando todo el rango diamétrico¹. La biomasa fue pesada por fracciones (hojas, ramillas de menos de 2 cm de grosor, ramas entre 2 y 7 cm y ramas de más de 7 cm de grosor), de acuerdo con el criterio definido por el INIA (Montero *et al.*, 2005) y después secada a 105 °C en estufa hasta peso constante (varias muestras por pie) para calcular su humedad. El fuste fue cubicado y también se tomaron muestras de rodajas para determinar su densidad y su contenido en humedad.

Aparte de seguir el criterio del INIA en la separación por fracciones, también se diferenciaron las producciones de madera según destinos, de acuerdo con el criterio señalado y las indicaciones de la cuadrilla que cortaba la madera, obteniendo los resultados de la *Tabla X*, referidos a porcentaje sobre peso total.

	% desenrollo	% sierra	% puntal	% ramera
Media	63,9	10,2	8,2	17,7
Rango	54,0-74,0	8,0-25,0	4,5-13,5	16,5-19,0

Tabla X: Distribución en peso por destinos de la madera.

Además de la media, se contempla un intervalo amplio ya que la distribución en fracciones es muy variable. Depende de múltiples factores, como el diámetro, la ramosidad, la tendencia a bifurcarse y el clon. A partir de estos inventarios, también se ha estimado el peso de la biomasa (considerando como tal la fracción formada por el puntal más la ramera), en función del diámetro normal (*Figura 110*) y, a partir de esa relación y la distribución diamétrica (*Figura 111*) o el diámetro medio de la masa, se puede estimar el peso de biomasa de cada chopera.

¹ Con la excepción de Lubia, en que no se han podido obtener datos sobre pesos de biomasa, sino sólo sobre las distribuciones diamétricas.

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

La cantidad de biomasa en una chopera de características medias está entre **70 y 100 t/ha astillando la ramera y el puntal**. Si sólo se astillase la ramera, descendería a 49 a 70 t/ha.

Para tener una idea de la cantidad que potencialmente se puede extraer de las choperas

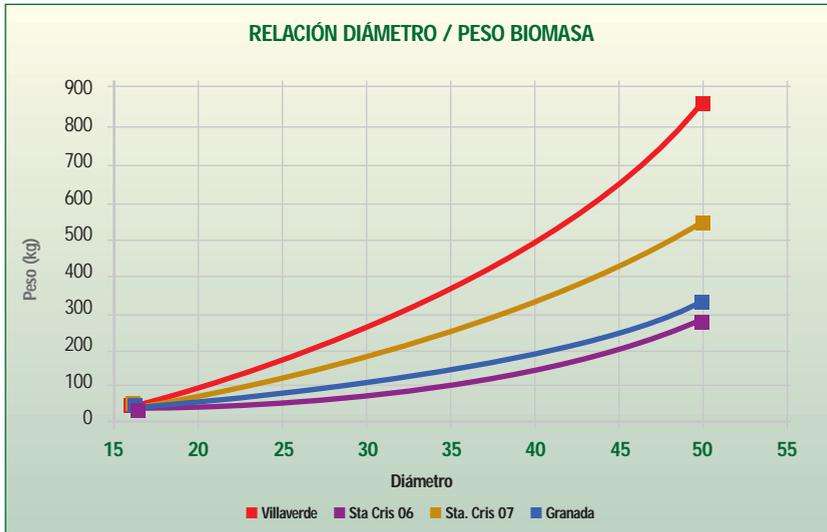


Fig. 110: Relación peso de biomasa / diámetro de las choperas estudiadas.

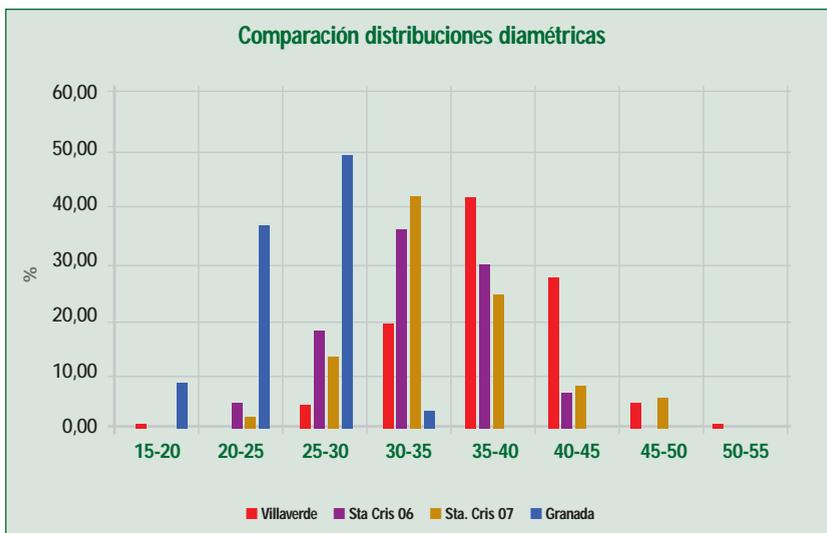


Fig. 111: Distribuciones diamétricas en las choperas estudiadas.

anualmente se plantean dos posibilidades. En la primera, se destina el puntal más la ramera al aprovechamiento energético, y en el segundo sólo la ramera. El peso de la biomasa en el primer caso equivale a un 34,3 % del peso del fuste, y un 23,9 % en el segundo. Suponien-

do que actualmente la producción de madera puede alcanzar más de 500.000 m³, para una densidad en verde de 0,7 t/m³, ello equivale a 350.000 t. Se tendría una producción potencial de **120.000 t** completamente verdes por año con fines energéticos en el primer caso y **83.500 t/año** en el segundo.

6.3. Breve descripción de las experiencias estudiadas

Aparte del aprovechamiento analizado con motivo de las demostraciones de campo de Expobioenergía 2006 en Villaverde de Mogina, se han estudiado de forma integral tres aprovechamientos de chopo durante el año 2007 e inicios de 2008, que se procede a describir a continuación.

- **Sistema 1:** aprovechamiento de una chopera en Santa Fe (Granada), con cosechadora y motoserrista el apeo y procesado de los árboles, acordonado de biomasa con cargador de brazo telescópico y astillado.
- **Sistema 2:** en Santa Cristina de la Polvorosa (Zamora), apeo y procesado con motoserrista y apilado de ramas y puntas con pala cargadora frontal o “grapa”.
- **Sistema 3:** en Luvia (Soria), apeo y procesado de árboles con cosechadora y motoserrista, astillado de la biomasa sin acordonar.

6.3.1. Descripción de las choperas

La distribución diamétrica de las choperas se muestra en la *Fig. 111*, y sus principales características se presentan en la *Tabla XI*.

	Ø medio (cm)	H media (m)	V. medio (m ³)	Edad	Marco
Granada (S1)	25	24,5	0,7	10	3,5x4
Sta. Cristina (S2)	35	32,2	1,5	14	5x5
Luvia (S3)	28	x	0,8	28	5x5

Tabla XI. Caracterización de las choperas estudiadas.

La chopera correspondiente al Sistema 1 contaba con una superficie de 1,75 ha, una densidad de 714 pies/ha –marco de 3,5 x 4 m–, y un diámetro medio de 25 cm. El turno de esta chopera es de tan sólo 10 años. La situación en las choperas en Granada es muy diferente a la de las castellano leonesas; el marco de plantación y el turno son menores, además se planta a menor profundidad, se plantan clones diferentes... En la Vega de Granada, los crecimientos son mayores que en la del Duero, y optan por turnos más cortos, en parte condicionados por las empresas madereras de la zona. Al estar los árboles más próximos entre sí en este sistema, son menos ramosos, y por tanto tienen un menor porcentaje de biomasa que los de las choperas castellano leonesas, lo que se compensa al haber un mayor número de pies por hectárea.

La chopera del Sistema 2 (Santa Cristina, Zamora), es una plantación de 14 años, con

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

marco de plantación 5x5 y de muy buena calidad. La superficie de la chopera es de aproximadamente 1,5 ha, con un total de 601 árboles, y un diámetro medio de 34 cm.

En cuanto al Sistema 3 (Lubia, Soria), se trata de una chopera de escasa calidad y muy pasada de turno, con una edad de 28 años y un diámetro medio inferior a 30 cm. Esta chopera tenía muchos árboles secos y el corazón de la madera estaba oscurecido.

6.3.2. Descripción de las operaciones

Sistema 1. El aprovechamiento de la chopera corrió a cargo del aserradero *Maderas Calero Tejera*, que habitualmente compra las choperas y realiza su aprovechamiento con medios propios para autoabastecerse, vendiendo la astilla proveniente de los restos de corta a una fábrica de tablero.

El apeo lo realizaba un motoserrista, con apoyo de una cosechadora (realmente una **retroexcavadora adaptada Komatsu con cabezal cosechador Keto 750**), que sujetaba el tronco en altura para orientar la caída. A continuación la cosechadora desramaba y tronzaba el árbol, separando las trozas según sus destinos. La madera era llevada a fábrica directamente por un tractor con remolque equipado con teleros, ya que la empresa opera en un radio de acción de pocos kilómetros.

El acordonado de la biomasa se realizaba con una **cargadora telescópica Helca JCB**, que tiene acoplado un rastrillo como se puede ver en la *Figura 112*. La **astilladora era una Pezzolato 480/660 acoplada a un tractor agrícola FENDT 916 de 210 CV**. Esta iba recorriendo los cordones, alimentándose con la grúa, y descargaba sobre un remolque de unos 35 estéreos, arrastrado a su vez por otro tractor agrícola que se colocaba paralelo a la astilladora (*Figura 113*). El tractor descargaba la astilla en alguna zona próxima a la chopera que tuviera un suelo firme, a ser posible asfaltado.



Fig. 112 y113. Acordonado de restos con rastrillo y astillado móvil con astilladora Pezzolato 480/660.

Sistema 2. En la chopera de **Santa Cristina** el apeo se realizaba de forma manual, con **motosierra** y **cargadora frontal de pinzas (“grapa”) Caterpillar 924G**. El apeo y desramado de los árboles lo realizaba un motoserrista, con ayuda de la grapa en caso de tener una caída difícil. La grapa recogía los fustes y los apilaba en cargadero, donde eran tronzados por unos motoserristas. Mientras los motoserristas tronzaban los fustes, la grapa acordonaba los restos para su posterior astillado, realizado por una **astilladora Erjo de 588 CV, integrada en un chasis de autocargador John Deere 1420D**. El sistema de astillado era similar al del

Sistema 1, es decir, astillado móvil a lo largo del cordón, descargando sobre un tractor que avanzaba con la astilladora.



Fig. 114 y 115: Apeo manual con apoyo de la grapa y desramado en Santa Cristina (Sistema 2).

Sistema 3. En Luvia, el apeo, desramado y tronzado de los árboles se realizaba con una cosechadora **Ponsse de 250 CV**, con la ayuda de un motoserrista auxiliar que cortaba los árboles, mientras que el cabezal de la cosechadora agarraba el fuste a unos tres metros de altura para orientar la caída en caso de que fuera difícil. La cosechadora en su avance iba abriendo calles amplias, dejando las trozas de desenrollo y las de sierra en un mismo lado de la calle pero separadas entre sí, y los restos para astillar en el otro. En este sistema no se acondonaban los restos, por lo que la astilladora (la misma del Sistema 2), tuvo que recoger los restos dispersos.

Los trabajos de llos Sistemas 2 y 3 fueron llevados a cabo por cuadrillas subcontratadas por la empresa consumidora, el grupo industrial Garnica Plywood. En ambos casos, el transporte de la madera a fábrica se realizaba en un **camión rígido con remolque, dotado de una grúa** que permite la carga y descarga de las trozas por sí mismo, y el transporte de la astilla en camiones de piso móvil de 90 m³, cargados con palas ligeras de brazo telescópico.



Fig. 116 y 117: Astilladora Erjo y camión rígido con remolque y grúa cargando las trozas (Sistema 3).

6.4. Consideraciones previas al aprovechamiento de biomasa

Antes de comenzar el aprovechamiento de la biomasa forestal en la chopera, se deben tomar ciertas decisiones sobre la logística del aprovechamiento, en cuanto al nivel de elaboración con que se va a tratar la biomasa, en definitiva, la calidad del producto que se va a producir, y el medio o medios de transporte con los que se va a contar para extraer la biomasa de la chopera y llevarla al centro de consumo.

6.4.1. Selección del lugar del aprovechamiento

La decisión de astillar los restos de corta de una chopera o no dependerá de muchos factores, aunque bien es cierto que en algunos casos es la única forma de tratar los restos de cortas, puesto que la Administración es cada vez más restrictiva en lo que se refiere a las quemas de restos; por tanto, más que estudiar si desechar el aprovechamiento de esos restos o no para biomasa en función de su rentabilidad, se tratará de buscar el sistema menos costoso de deshacerse de los restos de corta: astillado y extracción de los mismos para su aprovechamiento energético, o simplemente triturarlos *in situ* con una desbrozadora de martillos. Una serie de factores importantes a considerar son los siguientes:

- **El tamaño del aprovechamiento.** Cómo se estudia más detalladamente en el apartado de elección de medios de transporte, llevar las máquinas al tajo supone unos costes fijos de explotación muy elevados, por lo que si la chopera es pequeña, éstos resultan difíciles de asumir. El tamaño medio de las choperas en Castilla y León es de 1,07 ha (Calleja Sánchez, *et al* 2007). Para este tipo de choperas, una opción interesante puede ser utilizar astilladoras de poca potencia, con rendimientos menores, pero con costes también mucho menores y con menos limitaciones para el transporte.
- **La carga de biomasa a extraer por hectárea.** De acuerdo con fuentes de la empresa sueca Sydved, en 2005 se consideraba rentable actuar por encima de 40 a 50 toneladas verdes de restos por hectárea, para la rentabilidad en extracción de restos de cortas a hecho. Desde entonces, la demanda ha aumentado, lo que ha hecho subir lo precios y, por tanto, entrar en rentabilidad ciertos aprovechamientos con producciones inferiores. En las choperas estudiadas, la cantidad de biomasa a extraer está entre 70 y 100 t/ha (lo que equivale a entre 180 y 260 MWh/ha, ya que **1 t verde \approx 2,6 MWh, para la astilla de chopo**).
- **El matorral.** Si no se realizan gradeos durante los primeros años del turno, es posible que la chopera esté invadida por matorral que dificulte el trabajo al impedir la visión de la base del tronco. Esto aumenta la posibilidad de colisión del espadín con piedras, cortes poco eficientes que afecten a árboles que deberían quedar en pie, y provoca que los tocones queden más altos en el caso de apeo mecanizado, y en el apeo manual hará que el trabajo sea mucho más penoso para los motoserristas.
- **La localización de los cargaderos.** Tanto para la madera como para la astilla. Normalmente, los cargaderos de madera están dentro de la chopera, ya que estas se encuentran sobre terrenos sin pendiente y de fácil accesibilidad para los camiones, evitando zonas que se puedan encharcar fácilmente.



Fig. 118: Montón de astillas.

El punto de acopio de la astilla no debe necesariamente coincidir con el de la madera, aunque debe estar próximo a la chopera. Si es posible, los restos o las astillas se deben dejar sobre un suelo asfaltado o con solera de hormigón para evitar que se mezclen con la tierra y que por tanto disminuya la calidad de la astilla. Cuando esto no sea posible por la ausencia de un cargadero solado próximo a la chopera, el acopio se efectuará en un punto de fácil acceso para que los camiones puedan ser cargados y transportados con comodidad.

Para tener una idea de **la superficie necesaria de cargadero, se necesitarán 5 m² de superficie por tonelada de astilla**, suponiendo que el montón de astilla alcanza una altura máxima de 2,5 a 3 metros de altura. Si, por ejemplo, se trata de una chopera de 2,5 ha con una densidad de restos de 80 t/ha, se extraerían 180 toneladas de astilla (suponiendo una eficiencia en la extracción de restos del 90%) por lo que se necesitaría una superficie mínima de 900 m² en caso de que los camiones no vayan a cargar las astillas hasta después de terminados los trabajos.

- **Distancia de transporte a la central de suministro.** La distancia de transporte a la central de suministro condicionará la rentabilidad del aprovechamiento, debiéndose seleccionar adecuadamente tanto el método de tratamiento de la biomasa bruta como su forma de transporte.

6.4.2. Planificación previa

Una de las primeras decisiones que se deben tomar antes de decidir un aprovechamiento de la biomasa forestal en cualquiera de sus variantes es el esquema general del aprovechamiento en cuanto a la **elaboración que se va a dar a la biomasa** antes de entregarla al demandante (que en principio, será un pequeño o gran consumidor final –para producir calor

y/o electricidad– o un “almacenista” con capacidad de procesar la biomasa en un “terminal logístico” o centro de almacenamiento y procesado).

La decisión dependerá de las capacidades y especificaciones que este demandante imponga. Como ya se ha indicado, los demandantes son tanto más exigentes cuanto menor es su tamaño, como se especifica a continuación:

- En aplicaciones térmicas a escala doméstica o de pequeñas colectividades se exige astilla limpia, de granulometría pequeña y lo más seca posible.
- En el extremo contrario estarían los grandes consumidores o terminales logísticos con capacidad para el procesado posterior de la biomasa, que admitirán cualquier categoría de biomasa, aunque la pagarán a diferente precio en función de la humedad, tamaño y homogeneidad de las partículas, contenido en impurezas, etc.

En este último caso, la decisión sobre **si procesar o no la biomasa en monte** o cargadero es una cuestión de distancia de transporte, con el principio de que, dado que la preparación de la biomasa –astillado, limpieza, etc.– es siempre más eficaz y barata en destino, la mayor ventaja de su procesado en origen es la reducción de los costes de transporte.

En el caso de las choperas, el astillado *in situ* de los cordones es la opción más apropiada, ya que las choperas no están muy concentradas, de modo que el área de trabajo de una empresa de suministro o aprovechamiento de chopo es grande y las distancias podrían ser excesivas para el transporte de biomasa bruta (o bien los centros logísticos serían pequeños si sólo atendieran distancias de 25-30 km). No obstante, en el área más próxima al centro de consumo de biomasa se podría pensar en acarrear directamente la biomasa, especialmente si las choperas fueran pequeñas y los costes fijos debidos al transporte de la astilladora fueran elevados.

Además, **en las choperas las astilladoras pueden trabajar con rendimientos altos**, con una alimentación eficaz y continua, puesto que se trata de terrenos sin pendiente y abiertos, donde el operario no tiene que maniobrar mucho, ni con el tractor ni con la grúa para alimentar a la máquina y, como se ha indicado, se pueden alcanzar densidades de restos elevadas, entre 70-100 t/ha.

En este tipo de trabajos se opta por el astillado móvil o semimóvil en vez de transportar la biomasa a un centro logístico puesto que, en las choperas, las condiciones del terreno suelen ser tan favorables que son equiparables a las que se pueden dar en un terminal.

La posibilidad de acordonar los restos en fajas largas a lo largo de toda la chopera hace que la alimentación de la astilladora sea continua y eficaz. En este caso, se puede hablar de astillado semimóvil porque la mayoría de desplazamientos de la astilladora son a lo largo del cordón, como los que se producirían en un astillado en cargadero o planta. Así, generalmente se opta por astillar *in situ* puesto que el transporte de astillas es más rentable que el de restos, y en este caso no se ve compensado por unas condiciones notablemente mejores para el astillado.

Un aspecto importante en cuanto a la calidad de la astillas es la **foliación del árbol**. Es preferible aprear el árbol antes de que le salga la hoja, ya que ésta disminuye la calidad de la astilla al aumentar el contenido en álcalis y azufre de la astilla, así como el contenido en cenizas. Además, a la hora de acordonar los restos, las ramas arrastran más tierra si tienen hojas.

Puesto que las choperas se cortan prácticamente a lo largo de todo el año, es inevitable su aprovechamiento durante el periodo foliar. Durante esta época, se puede esperar a que las hojas se caigan de las ramas antes de astillar los restos, de manera que la astilla contenga menos impurezas y se extraiga menor cantidad de nutrientes del terreno.

6.4.3. Extracción de la biomasa. Elección del medio de transporte

Durante el astillado, cobra mucha importancia la parte organizativa en cuanto a la extracción de la biomasa, ya que puede afectar directamente al rendimiento de la astilladora. Se debe valorar dónde se deposita la astilla según sale por la cañonera de la astilladora.

La astilladora puede tener su propio contenedor donde depositar la astilla expulsada por la cañonera, ir acompañada de un tractor con remolque en paralelo y en algunos casos se podría astillar directamente sobre el contenedor de un piso móvil acoplado a un tractor. Lo que siempre se ha de procurar es que el tiempo de espera de la astilladora en cambiar un remolque o camión lleno por otro vacío, o el tiempo que emplea en volcar su contenedor, sea el mínimo.

Puesto que las choperas en la mayoría de las ocasiones son de fácil acceso, la opción mayoritaria de transporte es el camión de piso móvil con un semi-remolque de gran capacidad. Con este tipo de vehículos se pueden plantear dos opciones para el llenado del camión:

- **Acoplar el contenedor del piso móvil o los contenedores de un camión con remolque a un tractor o entrar directamente con el camión a la chopera.** En cualquiera de los casos, el remolque o contenedor podría transitar por la chopera en paralelo a la astilladora y ser cargado directamente por ella. Este sistema tiene alto riesgo de quedar parado fácilmente. Si el camión se retrasa o se atasca, la astilladora no puede trabajar, puesto que no tiene sistema de acumulación de astillas.
- **Astillado sobre un remolque de menor capacidad que haga los viajes a cargadero para descargar la astilla en el suelo o sobre camión.** Esta forma de trabajo permite trabajar a la astilladora a pleno rendimiento si se dispone de más de un remolque, pero el sistema incorpora, salvo que se pueda garantizar una logística compleja de “ruedas de camiones” coordinadas con el tractor, un nuevo elemento, la pala cargadora, y supone una fuente adicional de impurezas. Se debería evaluar la disponibilidad de camiones, la calidad de la astilla demandada, los posibles costes de mantenimiento incrementados y el precio horario del cargador de brazo telescópico o, en su caso, la pala cargadora de alto volteo (*Figura 119*).

En este último caso de astillado sobre remolque, se pueden elegir dos sistemas diferentes:

- **La astilladora descarga sobre un remolque que avanza paralela a ella.**
- **La astilladora tiene su propio contenedor acoplado.**

En el caso de la **astilladora descargando sobre remolque**, se ha de planificar el trabajo de manera que la máquina tenga los menos tiempos muertos posibles.

En el **Sistema de trabajo 1**, si se funciona con dos remolques, como el remolque tenía una capacidad de 35 m³ y se llenaba en poco más de una hora, en este tiempo al tractor que



Fig.119: Cargadora de brazo telescópico auxiliar necesaria si se descarga en suelo.

transportaba la astilla hasta el punto de acopio le tenía que dar tiempo a ir, descargar y volver. Si el tractor circula a una velocidad media de 25 km/hora y tarda 10 minutos en vaciar el remolque, la distancia máxima a la que se puede desplazar es de 20 km. Teniendo en cuenta que se suele desplazar sobre caminos cuya transitabilidad puede ser mala, se habría de buscar en ese caso un cargadero para una distancia no mayor de 15 km. En otros casos, habrá que hacer la estimación que corresponda al rendimiento de la astilladora, la capacidad del remolque y la velocidad del tractor.

Si el cargadero está a una distancia mayor de la que el sistema admite, se ha de contar con más de dos remolques para que la astilladora nunca esté parada en espera de uno vacío. Por ejemplo, un equipo de dos tractores y tres o más remolques. Un tractor haciendo viajes al punto donde se descargue la astilla y otro tractor en la chopera para mover el remolque paralelo a la astilladora, que puede ser el mismo que acordone los restos, ya que no hay que estar moviendo el remolque continuamente.

En este sistema, el tiempo de espera por cambio de remolque era casi el 30% del tiempo de presencia en la chopera, lo que significa que se perdía muchísimo tiempo de trabajo desde que se terminaba de llenar un remolque hasta que se colocaba otro paralelo a la astilladora.

Para reducir estos tiempos, el trabajo debe estar bien coordinado, y en caso de que el cargadero de astilla esté a una distancia mayor que la que le permita ir, descargar y volver antes de que el otro remolque haya sido llenado, se debería disponer de remolques adicionales para evitar que la astilladora esté parada.

Cuando **las astilladoras tienen su propio contenedor de astillas acoplado**, como la Erjo, se ven muy beneficiadas por el hecho de no tener que depender de un tractor auxiliar en su trabajo. La astilladora va avanzando a lo largo del cordón según va recogiendo los restos, sin preocuparse de que el remolque avance al mismo tiempo.

Una vez termina de llenar su contenedor, descarga sobre un remolque auxiliar que es el que hace los viajes al lugar de acopio para descargar. De esta manera, la astilladora evita per-

der tiempo en desplazamientos aumentando notablemente su rendimiento. La astilladora Erjo llena su tolva en 10-15 minutos, según sean las condiciones de la chopera, y en descargar sobre el tractor emplea entre uno y dos minutos.

Suponiéndole a la astilladora una velocidad de 5 km/h, que tarda en vaciar su tolva de 3 t verdes de astilla de capacidad 1,5 minutos, y 2 minutos adicionales en maniobrar para descargar las astillas en cargadero, **la productividad de la astilladora trabajando sin tractor auxiliar** para el desembosque de astillas, se podría expresar por medio de las ecuaciones siguientes.

- En condiciones favorables, en que se tarda en llenar la tolva 10 min:

$$\text{Prod (t/h)} = 180 / (13,5 + d/41)$$
- En condiciones poco favorables, en que se tarda en llenar la tolva 15 min:

$$\text{Prod (t/h)} = 180 / (18,5 + d/41)$$

siendo d la distancia de desembosque (ida) en m.

En el gráfico de la *Figura 120* se representa la pérdida de rendimiento que se produciría por el hecho de llevar a descargar los restos la propia astilladora, lo que hace evidente que resulta conveniente que sea un tractor auxiliar el que realice los desplazamientos al punto de acopio, al tener un coste horario mucho más reducido.

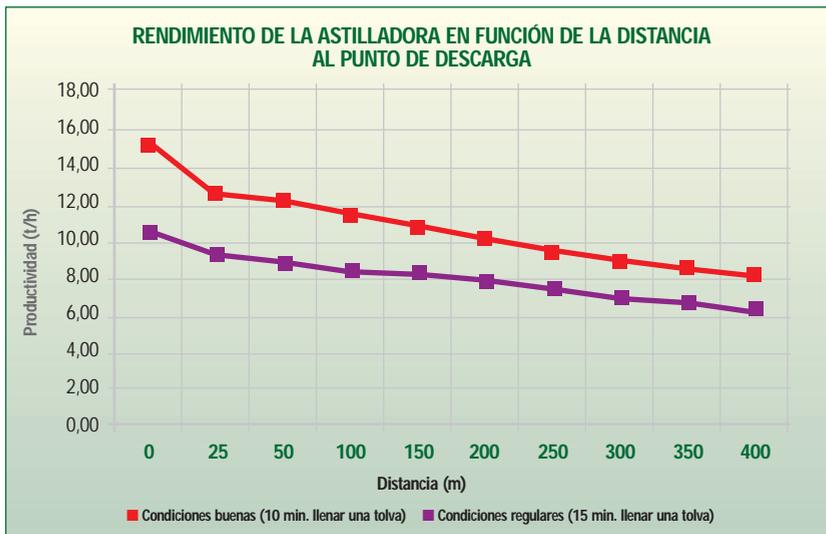


Fig. 120: Rendimiento de la astilladora en función de la distancia al punto de descarga en caso de no tener el remolque auxiliar.

En buenas condiciones del terreno, el tractor con remolque puede desplazarse a una velocidad de 15 km/hora. Tiene un radio de acción de hasta 1,5 km sin producir demoras en el astillado. Aunque el tractor tenga muchos tiempos muertos, es interesante que esté en la chopera, debido al alto coste horario de la astilladora. Es habitual que el cargadero de astilla esté en la misma chopera, junto a una zona de fácil acceso para el camión, por lo que el remolque puede estar parado más del 50% del tiempo de la astilladora.



Fig. 121: Astilladora volcando su contenido sobre tractor con remolque.

En la descarga de la astilladora Erjo sobre el remolque se empleaba entre un 5,5 y un 7,5 % del tiempo productivo. Para reducir estos tiempos, el operario del remolque debe procurar colocarlo en paralelo a la astilladora antes de que se termine de llenar su propio contenedor, para no hacer esperar.

El volumen del contenedor de la astilladora Erjo es de 22 m³ y la capacidad del remolque del tractor acompañante que sacaba la astilla al cargadero en Santa Cristina era de 30 m³, por lo que no alcanzaba para llenarse con dos contenedores enteros de la astilladora. Al no vaciarse totalmente el contenedor, el ciclo de llenado siguiente es más rápido y la operación de descarga es más frecuente. Para reducir el tiempo en la descarga, el remolque debería haber tenido capacidad suficiente para que el contenedor se vaciase completamente (en este caso, algo más del doble de la capacidad del mismo) para haber podido descargarlo completamente dos veces antes de desemboscar las astillas al cargadero.

El astillado sobre el contenedor del piso móvil es una opción interesante en el caso de disponer de una astilladora potente que tenga un rendimiento alto. En condiciones favorables, como la chopera del Sistema 2, con un rendimiento de astillado y descarga de más de 15 t/hora productiva (siendo 1 t \approx 5 estéreos), se puede llenar una tolva de 15 estéreos en 10,7 min de tiempo productivo. Si se descuenta el tiempo de descarga (1,34 min), se puede astillar 15 estéreos en 9,35 minutos., por lo tanto se tardaría en llenar un camión de 90 m³ aparentes 56,1 minutos.

Con una pala cargadora se tarda en llenar un camión unos 25 minutos, de manera que al llenarlo directamente desde la astilladora se tardarían alrededor de 30 minutos más. Por lo tanto, pagando al transportista un poco más por el tiempo empleado en la carga del camión, se ahorraría el coste de añadir la pala cargadora al sistema y se evita tirar la astilla al suelo, con la fuente de impurezas que ello supone al recogerlas. Esta opción se plantea más detalladamente en el capítulo de costes y rendimientos.

Como se ha indicado, se debe transportar la astilla cubierta con un toldo (que es obligatorio), salvo que el vehículo tenga un sistema de cierre superior de accionamiento hidráulico, aunque esta alternativa hace aumentar el riesgo de exceso de peso sobre el máximo autorizado (Figura 123).



Fig. 122 y 123: Piso móvil y remolque con tapa de accionamiento hidráulico.

En cualquier caso, acuerdo con González (1987), es conveniente que el mismo contratista que se encargue del astillado sea el responsable del transporte de astillas, lo que reduce los problemas logísticos.

6.5. Recomendaciones de ejecución, rendimientos, valores observados y referencias

6.5.1. Apeo, desramado y movimientos de fustes

Durante la primera fase del aprovechamiento, el apeo y desramado de los árboles, se encuentran dos posibilidades diferentes; apeo manual o con cosechadora. Cabe tener en cuenta las siguientes consideraciones y recomendaciones.

Apeo, desramado y tronzado mecanizados

- La cosechadora primeramente apea una serie de árboles y, una vez en el suelo, los va desramando y tronizando de uno en uno, dejando la biomasa a un lado de la calle que va abriendo, y la madera clasificada al otro. La pega de este sistema es que el cabezal de la procesadora no acordona los restos, por lo que la astilladora vería disminuido su rendimiento, de modo que se hace necesario introducir una máquina más en el sistema para acordonar los restos, como un tractor con rastrillo.
- Se debe procurar que el aprovechamiento sea lo más ordenado posible, y que las calles que ha ido abriendo la procesadora sean las mismas que luego siga el autocargador al recoger la madera, y por último la astilladora, para evitar que los restos se mezclen con tierra y piedras.

Apeo manual (con motosierra).

En este sistema, el motoserrista apea y desrama el árbol y posteriormente el fuste lo mueve una pala para llevarlo a zona de tronzado, donde se tronzan los fustes y se clasifican las trozas.

- La dirección de apeo debe ser siempre la misma, de manera que los fustes queden paralelos para facilitar el trabajo de la pala al recogerlos y llevarlos a cargadero, de modo que todas las copas estén en la misma franja para facilitar el posterior acopio.
- La grapa no debe pisar sobre los restos de corta, sino ir recogiendo la fila de fustes por la parte limpia del tronco, donde no se ha formado copa, para posteriormente poder acordonar los restos sin haberlos pisado y contaminado con tierra o barro (*Figuras 124 y 125*).

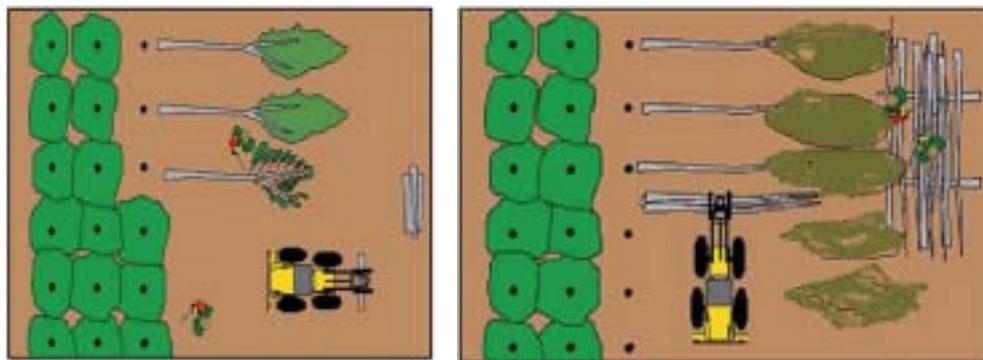


Fig. 124 y 125: Esquema de apeo manual (Dibujo adaptado de E. López Senesplada).

- A la hora de mover los fustes o las trozas, la grapa debe procurar elevarlos unos decímetros para evitar que sean arrastrados por el suelo, contaminando el material con tierra y piedras, especialmente dañinas para el torno de desenrollado. Lo mismo se puede decir de las ramas y copas, en que la contaminación por tierra puede suponer costosos problemas de desgaste y mantenimiento para las cuchillas de la astilladora y, además, una merma en la calidad de la astilla como combustible.

Recomendaciones generales

Desde el punto de vista del aprovechamiento de biomasa, es preferible el apeo manual y el acordonado con grapa. La cosechadora, al desramar un árbol, deja todos los restos de este concentrados, pero en pequeños montones, dado que no tiene la posibilidad de acordonar eficazmente cordones, mientras que la grapa puede dejar los restos acordonados sin que esto apenas suponga una disminución de rendimiento en su trabajo comparándolo con el tiempo que tendría que dedicar en cualquier caso en apartar los restos en un tajo en el que no se fueran a astillar.

- **El rabeón debe quedar entero**, sin desramar, ya que cuanto más grandes sean los restos mayor será el rendimiento de la astilladora, dado que se podrán recoger del suelo con mayor facilidad, y también será más fácil su alimentación.

- Hasta hace poco, las leñas se elaboraban; se desramaba y tronzaba para dejarlas preparadas en paquetes, pero actualmente resulta más rentable astillarlas directamente junto con las ramas y copa.
- En el momento presente, las trozas más delgadas, rectas y largas (entre 7 y 14 cm en punta delgada y con más de 1,5 m de longitud), pueden ser aprovechadas en forma de tronquillo para desintegración en la industria del tablero. El desramado, tronzado y carga en el camión de estas trozas supone mucho más trabajo que astillarlas directamente en monte, y el precio del producto en uno y otro caso es prácticamente el mismo.

El motivo de que se aproveche así esta troza responde más a condicionantes empresariales. Actualmente, el rematante que compra la madera y la aprovecha no suele ser el mismo que el que la astilla. Este último no paga nada al rematante por la astilla, y simplemente le ahorra el gasto de la eliminación de restos. Puesto que el rematante no va a recibir nada por los restos que se astillan, trata de aprovechar al máximo la madera, pero cuando el rematante aprovecha también la astilla, no emplea tiempo de trabajo de la cuadrilla en procesar la madera de peor calidad, aumentando el rendimiento en la madera de mayor valor.

Por lo tanto, cuando el aprovechamiento está planteado de forma integral, parece más acertado **dejar un rabeón a partir de 10-14 cm de diámetro para su astillado completo.**

6.5.2. Acopio de restos. Elaboración de cordones

En el aprovechamiento de la chopera, la reunión de restos se debe llevar a cabo en cualquier caso, por lo tanto la única preparación adicional que se requiere cuando se aprovechan como biomasa es un mayor cuidado a la hora de acordonarlos para ser astillados.

El objetivo de acordonar la biomasa es que la astilladora se alimente de la forma más eficiente posible y con el menor número de desplazamientos. En los estudios realizados se han encontrado diferentes modos de proceder, los cuales se describen a continuación.

Para garantizar el cuidado en estas operaciones, lo ideal es que la empresa que se encargue del aprovechamiento de la madera sea la misma, o por lo menos esté coordinada con la que efectúe el astillado.

- En el **Sistema 1**, el apeo y desramado eran mecanizados con cosechadora, y el acordonado de restos con un cargador de brazo telescópico tipo “*Manitou*” equipado con un rastrillo. El rastrillo que se utilizó en este sistema tiene la particularidad de tener un hueco entre los dientes, para permitir pasar por los tocones sin engancharse (*Figura 127*).
- En el **Sistema 2**, al apeo y desramado manual siguió el **acordonamiento de restos con pala cargadora frontal** (*Figura 126*).
- En el **Sistema 3**, se produjo el apeo y desramado con cosechadora **sin acordonamiento de los restos.**

El **rendimiento** de estas máquinas acopiando los restos es difícil de estimar, puesto que durante el tiempo de trabajo van haciendo diferentes actividades entremezcladas entre sí. En el caso de la grapa, iba agrupando los restos según extraía la madera, y en el caso del rastrillo



Figuras 126 y 127: Aperos para acordonar los restos: grapa (izquierda) y rastrillo (derecha).

llo se dedicaba a reagrupar los cordones cuando hacía falta según iba avanzando la astilladora, a formar los cordones y en ocasiones a tirar del contenedor de astilla.

- **El trabajo de la grapa** se registró mediante cronometraje continuo, donde se separa el tiempo de trabajo en operaciones elementales: desplazamiento, movimiento de fustes y trozas, ayuda en el apeo y retestado a los motoserristas y acordonado de restos. Un 13,8 % del tiempo de trabajo lo dedicaba al movimiento de los restos de corta, con un rendimiento en esta operación de **0,17 ha/hora** de trabajo.

En caso de que no se astillen las ramas y puntas, la grapa tiene que dedicar tiempo igualmente a amontonarlos para posteriormente quemarlos. En ese caso, comparando con otros cronometrajes llevados a cabo por el equipo de la U.P.M., el tiempo extra que se dedica a esa tarea es de un 8-10 % del tiempo de trabajo. Por lo tanto, el hecho de acordonar los restos supone un trabajo adicional para la grapa que ocupa entre un 4-6 % de su tiempo de trabajo, lo que supone un coste adicional de unos 20 €/ha, que para 85 t/ha repercutiría en 0,23 €/t de astilla en verde.

- Según los operarios de la **cargadora con el rastrillo acoplado**, su rendimiento acordonando restos únicamente era de una hectárea por jornada, aproximadamente **0,12 ha/hora**, rendimiento algo menor que el de la “grapa”. Sin embargo, con este apero se recoge un mayor porcentaje de los restos, y sin mezclarlos con tierra, además de complementar el trabajo de la astilladora. Esta máquina puede tirar de un remolque que acompañe a la astilladora y reagrupar los restos para facilitar el trabajo de alimentación de la astilladora.

En el trabajo de astillado con acordonado previo con rastrillo (Sistema 1), la grúa no apuraba la recogida de los restos de la parte baja de la pila, sino que el tractor se dedicaba a volver a apilarlos con el rastrillo e iba rehaciendo los cordones para que el maquinista de la astilladora recogiera los restos con mayor facilidad e incorporase menos impurezas (arenas, piedras...), lo cual es una importante ventaja para el rendimiento de la astilladora y la calidad del producto.

La idea del rastrillo con un hueco para poder pasar a través de una fila de tocones (*Figura 19*) facilita mucho las labores de acordonado, y previene el problema de romper alguna barra del rastrillo. La grapa no tiene ese problema, puesto que sólo tiene dos travesaños, pero la recogida es más eficaz con el rastrillo en cuanto al porcentaje de biomasa que recoge, al tener una separación menor entre travesaños.

Para un aprovechamiento mecanizado con cosechadora, cabe plantearse incorporar el rastrillo al sistema de trabajo, para dejar los restos acordonados y mejorar así el rendimiento de la astilladora. La ventaja frente al acordonado previo que se realiza en el apeo manual, es disponer de esta máquina en el tajo al mismo tiempo que la astilladora, para ayudarla en la recogida de restos. Si se utilizara únicamente para un acordonado previo, supondría un coste de 3,57 € a imputar sobre la tonelada de astilla, pero teniendo en cuenta lo que se ahorra al mejorar el rendimiento de la astilladora, este coste puede compensarse. Se debe valorar el hecho de que el coste horario del rastrillo es de 34 €/hora, e incluirlo en el sistema supone aumentar sensiblemente el rendimiento de la astilladora, cuyo coste horario es cuatro veces mayor.

Para evitar contaminar los cordones

- Al mover los restos, no deben ser arrastrados por el suelo para no coger tierra ni piedras; introducir una piedra en una astilladora puede producir un “mordisco” en una cuchilla, y si las ramas arrastran demasiada tierra las cuchillas pierden el filo mucho antes y hay que estar cambiándolas con mayor frecuencia. Para evitar este problema, el apero que se utiliza para acordonar, ya sea la grapa o la horquilla, debe elevarse unos decímetros para evitar el arrastre y moverlos la menor distancia posible.

Para maximizar el rendimiento de la astilladora

- Los cordones deben ser lo más largos posible, y distribuidos de manera que se minimicen los desplazamientos de la astilladora de uno a otro cordón.
- Para que el operario no tenga problemas para depositar los restos sobre la mesa de alimentación, estos no deben tener una longitud que exceda los 4-5 m, puesto que al tratarse de ramas, estas se “enredan” unas con otras y resulta muy difícil su manejo. En estos casos es recomendable dar unos cuantos cortes con la motosierra por las zonas del montón que tengan restos muy largos.

Dimensiones del cordón

- La anchura idónea del cordón de residuos dependerá del alcance de la grúa y de la posición que la astilladora tome respecto al cordón. Para la astilladora Pezzolato, con una grúa de menor alcance que la Erjo y trabajando en paralelo al cordón, su anchura óptima era de entre 4,5 y 5,5 m. Para la astilladora Erjo, con una grúa de mayor alcance, más alta, y trabajando perpendicular al cordón, una anchura idónea podía ser de hasta 9 a 12 m.
- La grapa permite comprimir las ramas y puntas con la pinza por lo que la superficie que ocupa el cordón es menor. Se estima que la superficie necesaria para acordonar los restos con la grapa es de 19 m² por tonelada verde de biomasa, que para una altura media de cordón de 2 metros equivale a 38 m³ aparentes, mientras que, con el rastrillo, la superficie necesaria para acordonar los restos es algo más del

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

doble, 38,8 m² por tonelada de restos y 77,5 m³ aparentes para una altura media de cordón de 2 m.

6.5.3. Astillado de restos y extracción de biomasa

En las choperas, los residuos se encontrarán, preferiblemente, acordonados en la zona de corta. Así, la astilladora se desplazará a lo largo del cordón con el menor número de desplazamientos posibles, recogiendo la biomasa, astillándola y lanzándola a un remolque acoplado a la astilladora o tirado por otro tractor que la acompañe, o al remolque del camión cuando sea posible.

6.5.3.1. Selección de la tecnología de astillado

La selección de la tecnología de astillado es de la máxima importancia. En los países nórdicos se utilizan frecuentemente **astilladoras de disco** sobre tractor agrícola potente, porque son más baratas, pero su alimentación es demasiado pequeña para trabajar con residuos, luego se trata de máquinas poco polivalentes. Las ramillas pueden pasar entre los discos sin ser astilladas por lo que habrá un material de peor calidad que en el caso de la de tambor, que lo astilla todo. **Las astilladoras de tambor producen una astilla más fina y homogénea, de buena calidad y además son menos sensibles a las impurezas.**

Las trituradoras sólo son justificables ante la existencia de abundantes impurezas de piedra o arena abrasiva. El hecho es que son máquinas más pesadas y requieren más potencia y tienen mayor consumo que las astilladoras, originando además un producto con menor valor añadido (*Figuras 128 y 129*).



Fig. 128 y 129: Producto elaborado por la trituradora (izda.) y por una astilladora (dcha.).

Lo más recomendable es utilizar astilladoras de tambor cuando los restos no estén muy mezclados con tierra y piedras. De no ser así, la opción más prudente es una trituradora o, en casos extremos como el aprovechamiento de tocones, una pretrituradora.

Otra elección importante es la potencia de la máquina. **El rendimiento** está íntimamente relacionado con la **potencia de la astilladora** (Spinelli y Hartsough, 2001): En la *figura 130* se observa como el rendimiento de la máquina aumenta con la potencia de la astilladora de manera notable hasta 250 kW (340 CV), y a partir de este valor el rendimiento es prácticamente asintótico.

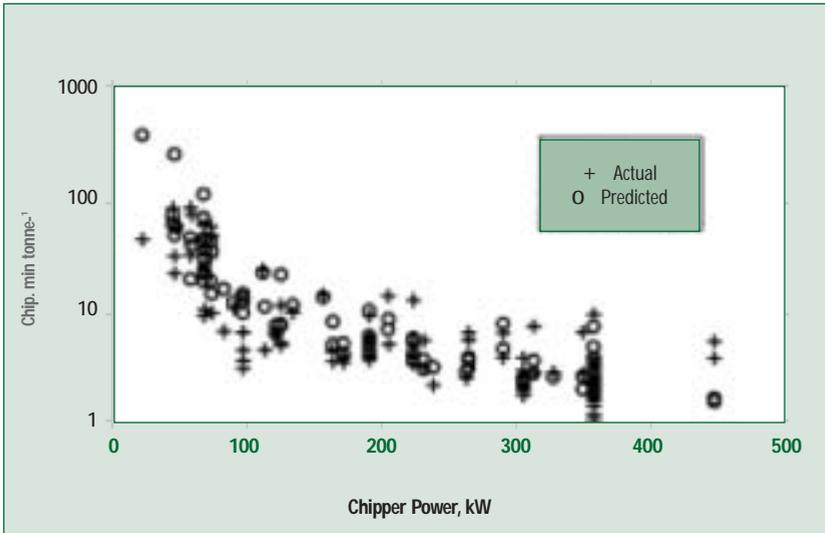


Figura 130: Tiempo de astillado (min/t) vs potencia de la astilladora (kW) (Spinelli y Hartsough, 2001).

Durante los estudios de campo, se ha llevado a cabo un cronometraje discontinuo multimomento de las astilladoras, a partir de los cuales se compara su rendimiento (Tabla XII).

- En los Sistemas 2 y 3, la astilladora es la misma, sin embargo el rendimiento es mayor en el Sistema 2, porque allí las condiciones de trabajo eran mejores: la biomasa había sido acordonada y era una chopera por la que se podía circular sin dificultad, mientras que la chopera de Lubia estaba atravesada por surcos y en ella la biomasa no estaba acordonada.

	Productividad (t/hora)	
	Tiempo productivo	Tiempo de trabajo
LUBIA (Erjo de 588 CV)	11,21	7,18
STA CRISTINA (Erjo de 588 CV)	16,19	7,93
GRANADA (Pezolato 480/660, de 215 CV)	5,69	3,44

Tabla XII: Productividad de las astilladoras móviles en las choperas objeto de estudio.

- En el Sistema 3, con una astilladora de menor potencia, la productividad puede llegar a ser tres veces menor frente a la Erjo. Esto refuerza la idea ya comentada de que hay una relación estrecha entre la potencia de la astilladora y su productividad.

Por ello, en cuanto a la potencia de la astilladora, conviene emplear astilladoras de cierta potencia desde el punto de vista del rendimiento, si bien se debe valorar el consumo que tenga la máquina y el coste unitario final al que se va a tener la tonela-

da de astilla, influido también por los costes fijos debidos al transporte de la máquina al monte.

6.5.3.2. - Características técnicas

- En el caso de restos demasiado húmedos y/o con hojas verdes, una pequeña **dimensión de la cañonera** y/o escasa potencia del ciclón podrían originar numerosos atascos en la cañonera.
- **En cuanto al equipo tractor o tren de rodaje de la astilladora**, si la astilladora está montada sobre camión es muy importante que el acceso del cargadero sea el adecuado. Una astilladora sobre autocargador o con tren de rodaje de oruga no tendría ese problema, pero su necesidad de transporte independiente origina problemas logísticos, especialmente si se usa en montes pequeños repartidos por un área extensa.
- **Las pinzas de la grúa de la astilladora deben tener mayor capacidad** que las que utilizan habitualmente para manejar la madera. Para ramas cortadas o puntas cortas son recomendables las pinzas tipo “pulpo” o las pinzas anchas a las que se quitan los travesaños y se refuerzan las puntas, mientras que para puntas largas predominantes –diámetros de aprovechamiento de biomasa elevados– pueden usarse pinzas similares a las de madera, para propiciar que la carga esté alineada para su mejor alimentación en el astillado.

El brazo de la grúa debe ser lo más largo posible.

- **La mesa de alimentación** debe ser lo más ancha y larga posible para poder depositar los restos sobre ella con facilidad, pero no demasiado, porque en ese caso la máquina tiene que estar más alejada del cordón, por lo que se limita el alcance de la grúa.

Para el astillado móvil (sobre los cordones, en la propia chopera), como en la mayoría de los casos los cordones no son demasiado altos, cuanto más baja sea la mesa de alimentación más cómodo le resulta al operario depositar la biomasa sobre ella, puesto que el movimiento de la grúa es más sencillo.

6.5.3.3. - Recomendaciones de astillado

- **No tiene sentido intentar recuperar el 100% del material acordonado**, incluyendo fragmentos desprendidos, ramas muy pequeñas, etc. Es mejor dejar algo de restos en el terreno que perder productividad global y aumentar las impurezas en el material.

En las choperas, se recoge un elevado porcentaje de la biomasa producida: en las experiencias estudiadas, el porcentaje de restos que queda en el suelo es del 7,5 % en el Sistema 1, en el que se utiliza el rastrillo, y del 12 % en el Sistema 2, en el que se utiliza la grapa. En el Sistema 3, donde no se acordonaron las ramas y puntas, hubo zonas donde quedó más del 35%, llegando a alcanzarse en ellas las 56,9 t/ha de biomasa sin extraer.

Como se ha señalado, **el acordonado de biomasa con grapa es más rápido que con rastrillo, pero este último deja menos biomasa sin aprovechar sobre el terreno.**

- La biomasa de la parte más baja de la pila es la que se astilla más despacio, porque en cada viaje la grúa carga menos y debe extremar la precaución para no arrastrar piedras. Por eso, la posibilidad de ir reagrupando los restos del cordón con el rastrillo resulta interesante y, en cualquier caso, no es recomendable apurar por encima de cierto límite, aunque parte de la biomasa pueda quedar en el terreno.
- Las ramas demasiado largas deben ser cortadas para facilitar su manejo. En ocasiones, se aprovechan árboles enteros si son de pequeñas dimensiones o su madera no es de calidad (secos o con pudriciones) que también deben ser cortados por la mitad para facilitar la alimentación.
- Cuando la astilladora descargue sobre un remolque tirado por otro tractor, éste debe estar atento para desplazarse según la astilladora avance a lo largo del cordón sin producir demoras en el trabajo.
- **Durante la alimentación, especialmente si se aprecia o sospecha la presencia de piedras, es importante sacudir el fajo de ramas con la pinza para propiciar que las piedras se desprendan.**
- En el cordón de biomasa, las ramas están orientadas en el sentido del cordón, por lo que si la astilladora está paralela al mismo y tiene alimentación lateral, tiene que estar continuamente girando con la grúa los restos para depositarlos alineados sobre la bandeja de alimentación. Para evitar perder mucho tiempo en manipular los restos, **la astilladora Erjo se colocaba perpendicular al cordón**; aunque tenía que emplear más tiempo en desplazarse con el tractor y maniobrar, **resultaba ventajoso al facilitar mucho la alimentación**. Para este fin, **podría ser de interés una astilladora de alimentación frontal**.

6.6. Dimensionamiento de equipos y logística del suministro

En las circunstancias estudiadas se requieren **3 jornadas de una cuadrilla formada por dos motoserrietas y una grapa o 2,5 jornadas de cosechadora por cada jornada de la astilladora integrada** en autocargador Erjo y, **para el caso de la astilladora remolcada por tractor agrícola Pezzolato**, este tiempo se reduciría a la tercera parte (es decir, se requeriría **1 jornada de cuadrilla o 0,83 jornadas de cosechadora**, dado el menor rendimiento de la astilladora).

Una astilladora Erjo trabajando 8 horas al día puede llenar 3,5 camiones de piso móvil de 90 m³ al día. En el caso de la astilladora Pezzolato, esta capacidad se reduce a 1,5 camiones por día.

6.7. Prácticas recomendables por razones selvícolas y medioambientales

En España, el 80% de las repoblaciones con choperas se encuentran sobre suelos francos, franco arenosos o franco arcillosos (Fernández Manso y Hernanz –Coordinadores–, 2004), en terrenos neutros o ligeramente ácidos (Balgañón, 2000). Por lo tanto, se encuentran en suelos poco sensibles (en algunos casos, medianamente sensibles) a la extracción de nutrientes, de acuerdo con lo indicado en el Capítulo 3 de este Manual Técnico.

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

Las zonas más adecuadas para la especie son las vegas próximas a los cursos de agua, por ser el chopo una especie que necesita tener un contacto directo con el agua. El óptimo altitudinal de plantación se encuentra entre los 500 y 1.000 m, en terrenos de nula o muy escasa pendiente.

Muchas de las choperas castellano leonesas se encuentran sobre suelos **aluviales**. Estos son suelos asentados sobre aluviones recientes, como son efectivamente las vegas de los ríos. Los suelos aluviales proceden de materiales diversos, sus propiedades físicas y químicas depende de las rocas que forman el cauce del río, del régimen de sedimentación, del clima... Por tanto, su naturaleza es cambiante en los diversos tramos, si bien son en general suelos con una alta potencialidad, tanto por su situación con respecto a los recursos hídricos como por su riqueza en elementos nutritivos.

Estos suelos tienen generalmente un pH superior a 7, con carbonatos libres, con un contenido medio en materia orgánica, valores medios o elevados de fósforo asimilable, riqueza de potasio media o baja y algo pobres en calcio.

Para evitar los efectos desfavorables debidos a la extracción de nutrientes, siguiendo a Cacot *et al.* (2004), las siguientes medidas son las más significativas para reducir los efectos negativos de la extracción de restos:

- Dejar secar los restos varios meses antes de su recogida. Ello puede reducir las pérdidas de nutrientes entre un 30 y un 45%.
- Recoger los restos o árboles de especies frondosas de hoja caediza en invierno.
- No recolectar adicionalmente los arbustos y vegetación acompañante
- Limitar, en función de las características del suelo, el número de recolecciones de restos a lo largo de la vida de la masa.

En cuanto a la **pérdida de nutrientes** que sufre el suelo, al analizar la **composición química de la biomasa** del *Populus x euroamericana* I-214, en sus diferentes fracciones (fuste, ramas, hojas y vegetación subterránea), la madera, con más del 80 % del peso total, es la fracción con concentraciones más bajas en todos los elementos, a excepción del C. En la fracción foliar, por el contrario, se registran los niveles de concentración más elevados de N, S, P, K, Ca, Mg, Mn y Zn, mientras que ramas y corteza presentan contenidos intermedios (Cruz Calleja, 2005).

Las ramas representan un 22% en peso, y el 35, 30, 29 y 22 % de P, N, K y C respectivamente. Tras la corta se extrae casi el 65 % de los nutrientes, los restos (ramas) representan un 26% de los nutrientes del árbol que dejan de ser incorporados al suelo en caso de que se aprovechen energéticamente.

	% peso y nutrientes											
	Peso	C	N	S	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn
Hojas	2,23	2,21	18,97	27,42	13,33	19,40	17,16	17,43	0,43	7,22	50,85	2,00
Ramas	19,20	19,37	27,50	19,35	29,33	26,42	21,68	28,44	7,22	10,31	13,56	18,00
Fuste	65,63	66,42	46,32	40,32	41,33	46,49	56,32	52,29	75,04	30,93	23,73	40,00
Subterránea	12,95	11,99	7,21	12,90	16,00	7,69	4,84	1,83	17,32	51,55	11,86	40,00

Tabla XIII: Porcentaje de contenidos medios de bioelementos en los diferentes componentes de la biomasa aérea, en una plantación adulta a la edad de 14 años (Cruz Calleja, 2005).

A lo largo del turno, los chopos van incorporando nutrientes al suelo mediante el **desfronde**. Como árboles caducifolios, concentran los máximos valores de desfronde en otoño (septiembre-noviembre). El máximo aporte de desfronde se produce a los 11 años, reduciéndose casi en un 25 % a la edad de 15 años.

De acuerdo con Cacot *et al* (2004), el calcio es el elemento, debido a los balances minerales, más susceptible de resultar deficitario después de una extracción intensa de material vegetal, seguido por el fósforo y el nitrógeno.

Comparando la evolución de las concentraciones de los bioelementos en hoja verde (septiembre) y en hoja de desfronde (noviembre), se observa la existencia de dos grupos de elementos claramente diferenciables. El primer grupo, N, P, K y S, con una retranslocación al árbol por parte de los nutrientes antes de la abscisión de la hoja; y, otro grupo, como Ca, Mg, Fe, Zn y Na, en que esta aparente redistribución de elementos no se lleva a cabo, habiéndose encontrado concentraciones superiores en las hojas de desfronde que en las fisiológicamente activas (Cruz Calleja, 2005). Consecuentemente, en otoño los contenidos foliares de aquellos elementos que sufren procesos de retranslocación son mínimos (Pedersen & Bille-Hansen, 1999; Berthelot *et al.*, 2000), y superiores en aquellos elementos que sufren un proceso de acumulación a lo largo del periodo vegetativo.

De todo lo dicho respecto al déficit de nutrientes que pueda sufrir el suelo tras el aprovechamiento de la biomasa, se pueden extraer las siguientes conclusiones: el turno habitual de corta de las choperas (14-16 años) es suficientemente largo para que la extracción de la biomasa no sea crítica en cuanto a la pérdida de fertilidad del suelo, puesto que está parcialmente equilibrada por el desfronde a lo largo de la vida de la chopera. Además, los terrenos donde se suelen plantar no son especialmente sensibles ante este hecho.

En cuanto al **destoconado** que se hace necesario para evitar el rebrote de los chopos, se puede realizar de tres formas: mediante tratamientos químicos, extrayendo los tocones con retroexcavadora o destococonador de cilindros, o con un destococonador de barrena helicoidal, tipo sin fin, que tritura el tocón en el terreno sin extraerlo del suelo. Este último sería el procedimiento más caro.

No es objeto de este capítulo el estudio del aprovechamiento de la biomasa subterránea, pero cabe hacer los siguientes comentarios:

- Sería preciso valorar la pérdida de nutrientes adicional que sufriría el suelo con la extracción de tocones.
- El tocón, al estar entremezclado con la tierra y las piedras, da un producto de una calidad mucho menor que la biomasa aérea o, para dar un producto mejor, requiere un postratamiento caro.
- Para poder utilizarlo con fines energéticos se ha de triturar primero con una pretrituradora de martillos, y posteriormente cribarlo en una criba y astillarlo.
- En muchos casos, se extraen los tocones con retroexcavadora, se voltean para evitar su rebrote y se vuelven a depositar donde estaban, y en otros se amontonan todos juntos y se entierran en un extremo de la chopera. Puesto que esta operación se hace de todas formas, habría que valorar el coste de oportunidad que supone el hecho de que la extracción y el acopio de tocones se haga de todas formas al margen de que después se vaya a triturar o no.

Además, es importante, como en cualquier aprovechamiento forestal, tomar medidas preventivas del riesgo de incendios y evitar por todos los medios el dejar basuras o residuos en la chopera.

6.8. Recomendaciones relativas a la calidad de la biomasa. Resultados de los análisis de combustibles

Ya se ha comentado la influencia de la humedad, la granulometría y la presencia de arena y hojas en la calidad y el precio de la astilla, en función también de su destino.

Las principales normas orientadas a obtener una biomasa de mayor calidad son las siguientes:

- **No arrastrar o incorporar tierra ni piedras con la biomasa.** En el caso de las choperas, la contaminación se puede producir mayoritariamente **en el acordonado**. Otra posible fuente sería, en el caso de descargarse astillas en el suelo, **la carga de astillas con pala**. Las principales medidas en este caso, serían el acordonado de restos con horquilla o grapa para elevarlos unos decímetros del suelo y evitar así que arrastren mucha tierra, y procurar la descarga de astilla directa en camión –en caso de no poderse, buscar un suelo asfaltado próximo a la chopera donde descargar la astilla y no apurar en la carga de astilla cuando se recoja de un suelo sin asfaltar–.
- **Dejar secar biomasa y/o astillas para que el combustible llegue lo más seco posible a su destino, por el mayor poder calorífico.** Ya se ha comentado la conveniencia de dejar secar los restos por razones ambientales, pero en muchos casos se procura un secado adicional de los árboles extraídos en el cargadero, siempre que esto no suponga riesgos fitosanitarios o de incendios por encima de lo tolerable. En el caso de las frondosas, dejar secar los árboles aumenta su dureza, lo que conlleva mayor desgaste de cuchillas y mayor potencia necesaria –y consumo de combustible–. También se produce más polvo –mayor proporción de finos–, lo que no resulta positivo para la calidad del propio combustible ni tampoco desde el punto de vista ergonómico y ambiental. Hay que buscar un equilibrio, en función del equipo disponible, entre el mayor precio de la biomasa por su mayor poder calorífico por estéreo, y los problemas logísticos y operativos de trabajar con biomasa seca. Entre otros, para el uso adecuado de una astilladora, reduciendo los costes fijos, conviene recurrir a un programa de optimización del transporte en función de la posición de las pilas, el momento de su apeo y desembosque, la época del año y las características de la demanda.
- En función del destino, el contenido en álcalis y en cenizas en general puede ser perjudicial y dar lugar a rechazos o penalizaciones. En principio, a mayor calidad exigida para la biomasa, más conveniente será que no incluya hojas, para lo que es también conveniente que se seque en monte. Esto también sería positivo desde el punto de vista de la pérdida de nutrientes, aunque es verdad que antes de la caída de las hojas, los árboles recuperan parte de los nutrientes trastocándolos desde las hojas al tronco, ramas y raíces.

Análisis de astillas

En las experiencias estudiadas se recogieron muestras de astillas que se analizaron con el fin de obtener el **contenido en humedad y caracterización energética**, de este tipo de astillas.

La **humedad del material** inmediatamente después de ser astillado dependerá de la proporción de hojas, material fino y material grueso que se astille, de la época el año, del tiempo transcurrido entre el apeo y el astillado, y de las precipitaciones y humedad de los días previos al astillado.

En el **Sistema 1**, se tomaron muestras de astilla en choperas en las que había transcurrido dos meses entre el astillado y el apeo en dos choperas de similares características pero en distintas épocas (mayo y octubre), la humedad de las astillas en Mayo fue del 11,3 % y en Octubre, después de un periodo de lluvias intensas esta humedad ascendió al 66,6 %, siempre sobre base húmeda.

En el **Sistema 1**, la humedad de la astilla proveniente únicamente de puntas de entre 12 y 7 cm fue del 47,2 %, mientras que la humedad de una muestra proveniente de ramilla fina y hojas fue del 40,7 %. Cuanto más fino sea el material, más rápidamente perderá humedad, pero no se debe olvidar que las hojas, aunque pierdan la humedad fácilmente, empeoran la calidad de la astilla. En este caso, la chopera fue apeada un mes antes del astillado.

En el **Sistema 3**, la humedad de la astilla fue del 41,9 %, astillada justo a continuación (una semana) de ser apeada.

Estas muestras de astillas también han sido enviadas al Laboratorio Regional de Combustibles (LARECOM) perteneciente a la Junta de Castilla y León, donde se llevaron a cabo los análisis de composición química, humedad y caracterización energética cuyos resultados aparecen en la *Tabla XIV*.

	(ZAMORA)						GRANADA		
	ASTILLAS DE MADERA Y HOJAS			ASTILLAS DE MADERA			ASTILLAS DE MADERA		
	s/seco	s/s.a.	s/bruto	s/seco	s/s.a.	s/bruto	s/seco	s/s.a.	s/bruto
Humedad secado aire (%)			45,09			38,97			32,86
Humedad higroscópica (%)		4,6	2,53		4,96	3,03		5,6	3,76
Humedad total (%)		4,6	47,61		4,96	41,99		5,6	36,62
Valátiles (%)	84,51	80,63	44,28	80,37	76,38	46,63	71,82	67,8	45,52
Cenizas (815°C) (%)	0,8	0,76	0,42	3,17	3,02	1,84	12,12	11,44	7,68
Carbono fijo (%) <i>calculado</i>	14,7	14,02	7,7	16,46	15,65	9,55	16,06	15,16	10,18
Carbono (%)	49,74	47,45	26,06	49,36	46,91	28,63	44,51	42,02	28,21
Hidrógeno (%)	6	6,23	8,43	5,96	6,21	8,12	5,35	5,67	7,46
Nitrógeno (%)	0,08	0,08	0,04	0,36	0,34	0,21	1,01	0,95	0,64
Cloro (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	0,05	0,03
Azufre (%)	0,02	0,02	0,01	0,04	0,04	0,02	0,09	0,08	0,06
Oxígeno (%) <i>calculado</i>	33,37	44,47	65,05	41,13	43,5	61,19	36,87	39,78	55,92
Poder calorífico superior (PCS) _i (Kcal/Kg)	4677	4462	2451	4669	4437	2708	4205	3970	2665
Poder calorífico inferior (PCI) _i (Kcal/Kg)	4368	4142	2027	4361	4117	2298	3926	3675	2287
Poder calorífico inferior (PCI) _p (Kcal/Kg)	4350	4123	2000	4343	4098	2273	3910	3658	2263

Tabla XIV: Resultados del análisis de las astillas (chopo).

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

Las muestras de astillas formadas por madera y hojas presentan un mayor porcentaje de cenizas que las de madera sola; aunque el contenido en cloro es muy bajo, se debería estudiar los riesgos que puedan provocar una reducción de la calidad de las astillas como combustible.

Se puede realizar una clasificación energética de astilla como combustible según la clasificación finlandesa de biocombustibles sólidos de origen forestal (Marcos, 2001), que se muestra en las *Tablas XV* y *XVI*. De acuerdo con la clasificación finlandesa, se obtienen los siguientes resultados:

- La astilla de chopo es de la mejor calidad respecto a la densidad energética y presenta un valor medio de 1,37 MWh/m³ sólido (seco).
- Según el contenido de humedad pertenece a la segunda clase de la escala con un valor medio del 45%.

DENSIDAD ENERGÉTICA			HUMEDAD			TAMAÑO		
Clase	MWh/m ³	Calidad	Clase	% en base	Calidad	Clase	Astilla 95% < mm	Calidad
E1	0,9	Mejor	K1	40	Mejor	P1	30	Mejor
E2	0,8	↓	K2	50	↓	P2	45	↓
E3	0,7	↓	K3	60	↓	P3	60	↓
E4	0,6	Peor	K4	65	Peor	P4	100	Peor

CLASIFICACIÓN FINLANDESA	ASTILLAS SISTEMA 2			CLASE
	Madera y hojas	Madera	Promedio	
Densidad energética MWh/m ³	1,26	1,47	1,37	E1
Humedad	48	42	45	K2

Tablas XV y XVI: Clasificación finlandesa (Marcos,2001) y encuadre de la astilla del sistema 2 en esta clasificación.

En líneas generales se puede clasificar la astilla de chopo como de óptima calidad. Esta información es útil para el posible consumidor de este producto y puede aportar un valor añadido al aprovechamiento de la astilla de chopo.

6.9. Estimación de costes del suministro de biomasa a partir de restos de choperas

En la *Tabla XVII* se presenta un resumen de los costes de aprovechamiento de la madera y la astilla en los tres aprovechamientos estudiados, del que se pueden extraer algunas conclusiones.

- En el coste total de la madera y la astilla resultante no están incluidos el beneficio industrial ni los costes indirectos y de estructura. Tampoco están incluidos los costes fijos de explotación por tener que transportar las máquinas de un tajo a otro, ni los costes de transporte de la astilla desde la choperas al centro de consumo, ni el precio de la madera o de la biomasa “en pie”.
- Los costes de elaboración de la madera son ligeramente menores en el apeo manual que en el apeo con procesadora (8,30 €/t en Sta. Cristina frente a 10,40 €/t en Lubia). No obstante, para valorar esta circunstancia habrá que tener en cuenta la cre-

ciente dificultad para encontrar personal y los mayores costes indirectos que esta dificultad supone.

COSTES STA. CRISTINA					
	Coste horario (€/h)	Rendimiento (t/h)	Coste unitario (€/t)	Coste total (€/t madera)	Coste total (€/t astilla)
Motoserristas	44,00	11,82	3,72	8,07	
Grapa	55,44*	12,11	4,35 (madera)		
				0,23 (astilla)	21,08
Astilladora Erjo	130,51	7,93	20,85		
Tractor con remolque	34,85				

*Se imputa el 5% del coste horario de la grapa a la astilla puesto que es el porcentaje de tiempo de trabajo que corresponde al acordonado de restos para la astilladora.

COSTES LUBIA					
	Coste horario (€/h)	Rendimiento (t/h)	Coste unitario (€/t)	Coste total (€/t madera)	Coste total (€/t astilla)
Máquina					
Procesadora Ponsse	108,52	20,49	5,30	10,40	
Autocargador Ponsse	55,39	10,86	5,10		
Astilladora Erjo	130,51	7,18	23,03		23,03
Tractor con remolque	34,85				
COSTES GRANADA					
	Coste horario (€/h)	Rendimiento (t/h)	Coste unitario (€/t)	Coste total (€/t madera)	Coste total (€/t astilla)
Máquina					
Procesadora	70,85	9,26	11,59	14,25	
Tractor con remolque	36,45	13,68	2,66		
Astilladora Pezzolato	74,68	3,44	31,42		34,63
Rastrillo	33,40				
Tractor con remolque	34,45	10,73	3,21		

Tabla XVII: Costes de aprovechamiento en las experiencias estudiadas.

- El coste de elaboración de astilla también es menor en Sta. Cristina que en Luvia, tratándose de la misma máquina, los mismos operarios e incluso el mismo sistema de trabajo (20,85 €/t en Sta. Cristina frente a 23,03 €/t en Luvia). Esto se debe a que el rendimiento de la astilladora en el segundo caso disminuye, al no estar acordonada la biomasa, y a pesar del mayor volumen unitario y total.
- La elaboración de la astilla con la astilladora Pezzolato, que toma la fuerza de un tractor de 215 CV, es en torno a un 50 % más cara que con la astilladora Erjo de 588 CV. El coste horario de la Pezzolato es casi la mitad que el de la Erjo, pero el rendimiento de la segunda es casi 2,5 veces el rendimiento de la primera. Además, el coste de la astilla en el caso del sistema de aprovechamiento de Granada se ve agravado por la necesidad de incluir una máquina adicional, el rastrillo para acordonar los restos.

En cuanto a los costes fijos de explotación que supone transportar las máquinas de un tajo a otro, se deben tener en cuenta las siguientes cuestiones:

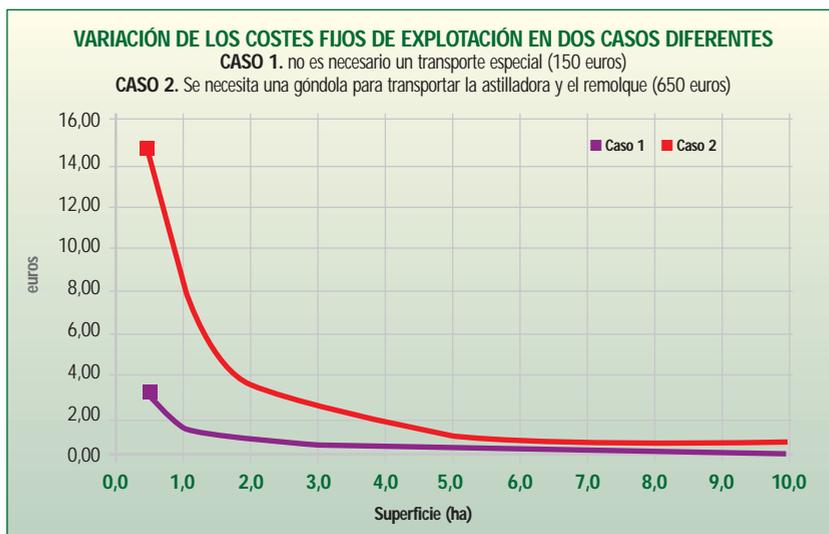


Fig. 131: Variación de los costes fijos de explotación en función de la superficie de la chopera y del tipo de transporte.

- Una astilladora móvil acoplada a un camión, puede circular por cualquier tipo de vía. Mientras que una astilladora acoplada a un tractor no puede circular por carreteras principales y en muchas ocasiones tiene que ser transportada por una góndola, lo que supone un aumento en el coste final de la elaboración de la astilla.
- El coste que se deriva del transporte de las máquinas será inversamente proporcional al tamaño de explotación de las choperas.
- El precio de alquiler de una góndola se encuentra entre los 2 y 2,5 €/km ida + vuelta, pero esta no es necesaria cuando la distancia de un tajo a otro no es muy grande y se puede hacer por caminos secundarios.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizan dos hipótesis de cálculo: En el primer caso (caso 1), el radio de trabajo de la astilladora es pequeño y para ir de un tajo a otro no necesita góndola, y en el segundo (caso 2), la góndola es necesaria en todo caso.

		Coste unitario (€/t astilla)	
Superficie (ha)	biomasa (t)	Caso 1	Caso 2
0,5	45	3,33	14,44
1,0	90	1,67	7,22
1,5	135	1,11	4,81
2,0	180	0,83	3,61
5,0	450	0,33	1,44
10,0	900	0,17	0,72

Tabla XVIII: Costes fijos de explotación.

		Coste
Distancia	transporte	(€/t de astilla)
25	7,11	
50	8,37	
100	10,85	
200	15,93	
300	20,96	

Tabla XIX: Costes de transporte.

- En el caso 1, sólo se imputa como coste de explotación 150 €, que representan unas tres horas de trabajo del operario y el gasto en combustible. Esta hipótesis es representativa del estudio de Granada; una astilladora de poca potencia que actúa en un radio de acción pequeño.
- En el caso 2, suponemos un coste fijo de explotación medio de 650 €, porque se tiene que transportar las máquinas con una góndola.

Estas dos hipótesis vienen representadas por la *Tabla XVIII* y la *Figura 131*. En esta última se aprecia que los costes de explotación pueden ser imposibles de asumir para choperas pequeñas, hasta llegar a 14 €/t para una choperas de media hectárea, lo que podría suponer hasta un 40 % de los costes totales de elaboración. Recuérdese que la superficie media de las choperas en Castilla y León es de 1,07 ha.

En cuanto al transporte de la astilla al centro de consumo, este se suele hacer normalmente con camiones trailer de tipo móvil de 90 m³ de capacidad ya que las choperas generalmente no presentan problemas de accesibilidad ni de transitabilidad, al estar en terrenos sin pendiente. El único obstáculo es que en periodos muy lluviosos los camiones pueden tener problemas de adherencia.

El coste de transporte será mas bajo cuanto menores sean las distancias de transporte.

En la *Tabla XIX* se representa como aumenta el coste de transporte sobre la tonelada de astilla en función de la distancia. Para este cálculo se supone una capacidad de la caja de 17,5 t (puesto que la densidad de la astilla de chopo en verde es de alrededor de 0,2 t/estéreo), que el tiempo que se tarda en cargar la caja con una pala cargadora y luego vaciarse suma aproximadamente una hora, la velocidad media del camión es de 80 km/hora, el coste horario de un piso móvil es de 70,67 €/h y además hay que tener en cuenta el coste que supone la pala cargadora, unos 120 €/día.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede tener una idea bastante aproximada del coste de elaboración y transporte de una tonelada de astilla puesta en el centro de consumo. Por ejemplo, para una astilladora Erjo que requiriese movimiento en góndola, trabajando en buenas condiciones en una choperas de 1,5 ha, y transportando la astilla una distancia de 100 km, el precio de la tonelada de astilla sería el siguiente:

- 20,85 + 4,81 (costes de elaboración + costes fijos de explotación)	25,66 €/t
- Gastos indirectos y de estructura (15 %)	3,85 €/t
- Beneficio industrial (12%)	3,08 €/t
- Costes de transporte	10,85 €/t
TOTAL	43,48 €/t

6.10. Otras experiencias

6.10.1. Introducción

Durante los meses de abril a junio de 2008, la empresa Ricardo Cubero S.L. trituró ramas y copas de varias cortas de choperas en la comarca de Almazán: en Viana de Duero, Velama-

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

zán y Lubia, siendo objeto de seguimiento por el equipo redactor del presente Manual Técnico.

Esta empresa ha operado con dos tipos de máquinas distintas para la elaboración de biomasa: una trituradora y una astilladora. El presente apartado es un resumen de los resultados de las experiencias estudiadas en el que se comparan rendimientos de las dos máquinas, costes, aspectos operativos y características de los productos obtenidos.

6.10.2. Descripción de la maquinaria

Para el trabajo de elaboración de biomasa, la empresa disponía de las siguientes máquinas:

- **Trituradora de martillos** Jenz AZ 55DMotor propio 430 c.v.
- **Astilladora** Jenz 560 D. Acoplada a un tractor con una potencia de 190 c.v.
- **Dos cargadoras telescópicas** Manitou.
- **Tractor con remolque** de 10 m³ de volumen aparente.
- **Retroexcavadora** Case.
- **Camión de piso móvil** con una caja de 85 m³ de volumen aparente para el transporte de la biomasa a central.

La trituradora y la astilladora estaban alquiladas por la empresa con opción de compra. La intención de la empresa era probar estas máquinas para tener una noción de los pros y contras de cada tecnología y finalmente optar por una de ellas.



Figura 132: Astilladora Jenz 560 D.



Figura 133: Retroexcavadora alimentando a la astilladora.

La idea del empresario, en un principio, era utilizar la astilladora cuando el material fuera más homogéneo y más limpio, como árboles enteros o restos de corta con ramas de más de 10 cm de diámetro. Para el resto de trabajos, en los que el material fuera más heterogéneo, estuviera mezclado con tierra o se tratase de restos de corta de pequeño diámetro, pensaba utilizar la trituradora.

- La **astilladora** puede trabajar tanto en móvil como en fijo. En el astillado móvil, va recorriendo la chopera y descargando sobre un **tractor con remolque** que va en pa-

ralelo con ella, y en el trabajo en fijo, astillando directamente al suelo los restos previamente amontonados en un cargadero.

Esta máquina tenía entre 8 y 10 años, con más de 15.000 horas de trabajo en el momento en que fue alquilada por la empresa. Además del hecho de ser vieja, presentaba el inconveniente de su limitada potencia.

El material que producía era demasiado pequeño. Para producir un tamaño de astilla mayor, lo que se hace normalmente es reducir el régimen de revoluciones al que gira el tambor de la astilladora, pero esta máquina no podía trabajar eficazmente a un régimen de revoluciones bajo debido a su escasa potencia.

- En cuanto a **la trituradora**, esta máquina sólo tenía la posibilidad de trabajar en fijo. En algunos casos, la trituradora descargaba directamente al suelo, pero en la chopera de Velamazán se probó a expulsar el material sobre la caja del camión para poder así evitar tener que cargar el camión con otra máquina adicional. Esta máquina tenía en torno a las 5000 horas trabajadas en el momento del alquiler y llevaba funcionando desde el año 2003.

En un primer momento, fue alimentada con una **cargadora telescópica “Manitou”** y después por una **retroexcavadora**, que era una máquina muy vieja, con más de 30 años.

- **Las dos cargadoras telescópicas** llevaban a cabo diversas funciones; amontonar los restos en un cargadero para la trituradora, desplazar la trituradora cuando era necesario, cargar el material triturado en el camión y en ocasiones la alimentación de la trituradora.
- La empresa disponía, además, de un **camión de piso móvil**. En la chopera de Viana de Duero, utilizaban este camión para transportar el material al centro de consumo, pero en el caso de Velamazán, la utilizaban a modo de remolque sobre el que descargaba la cinta transportadora de la trituradora, como se aprecia en la Figura 135. Una vez lleno, se llevaba el material al cargadero, que se encontraba a una distancia de unos 300 metros.

Para que la cinta llegase al camión, se bajaron los laterales del camión y su capacidad disminuía de 85 a 40 metros cúbicos aparentes.

6.10.3. Localización y descripción de las masas estudiadas

6.10.3.1. – La experiencia de Lubia

Esta chopera se encuentra dentro del C.E.D.E.R. (Centro de estudios de Energías Renovables, del Ministerio de Industria y Energía) en Lubia (Soria). El aprovechamiento de madera fue llevado a cabo por la empresa Monzón 21. La chopera tiene una superficie de 5,4 ha con un marco de plantación de 5x5 m.

El material que había quedado para ser triturado o astillado eran los restos de corta de una chopera cuyo aprovechamiento llevó a cabo la empresa Monzón 21. Durante la visita a

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

campo para realizar el estudio, la trituradora no estaba trabajando puesto que necesitaba una puesta a punto, por lo que se controló únicamente el rendimiento de la astilladora.



Figura 134. Trituradora remolcada por la cargadora telescópica Manitou.



Figura 135: Cargadora telescópica Manitou cargando un camión de piso móvil con material triturado.



Figura 136: Alimentación de la astilladora.



Figura 137: Remolque sobre el que descarga la cañonera de la astilladora.

La astilladora realizaba un astillado móvil de los restos sin acordonar y su cañonera descargaba sobre el remolque del tractor acompañante, que avanzaba en paralelo a la misma. Una vez lleno el remolque el tractor, llevaba los restos a un cargadero que se encontraba a unos 500 m, descargaba y volvía. Durante todo este tiempo la astilladora permanecía parada, en espera del remolque.

6.10.3.2. – La experiencia de Viana de Duero

Esta chopera se encuentra en el Término Municipal de Almazán (Soria). El aprovechamiento fue llevado a cabo por la empresa Monzón 21, durante el año anterior. Se trabajó principalmente con la trituradora, y únicamente se astilló un montón de restos para estudiar el rendimiento de la astilladora.

Los restos de corta se encontraban acordonados al llegar a la chopera, pero como se tra-

bajó con la trituradora, los restos se acopiaron en varios montones grandes a lo largo de la misma, en los que la trituradora trabajaría en fijo, alimentada por la retroexcavadora.

El triturado se expulsaba al suelo y posteriormente se cargaba en el camión de piso móvil con la pala telescópica.

6.10.3.3. – La experiencia de Velamazán

La chopera estaba en el Término Municipal de Velamazán (Soria), en un predio que pertenece a su Ayuntamiento (*Figura 138*). Era una chopera de 2.350 chopos con una superficie aproximada de 8,4 ha y un marco de plantación 6 x 6. Estaba pasada de turno, con 18-20 años de edad. El clon era el I-214. La empresa encargada de la ejecución del aprovechamiento fue Maderas Anadón S.A.



Figura 138: Localización de la chopera de Velamazán

Los restos de corta quedaron acordonados y, para triturarlos, se reunieron en cordones como en el caso de la chopera de Viana de Duero. En esta ocasión, puesto que el camión no tenía problemas para transitar por la chopera, la trituradora descargaba directamente sobre su caja.

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

En esta chopera, además de controlar el rendimiento de la trituradora, se realizó un inventario previo y se controló el trabajo de los motoserristas apeando árboles.

6.10.4. Inventario y estimación de biomasa

6.10.4.1. – Resultados del inventario en la experiencia de Velamazán

En la chopera de Velamazán, se llevó a cabo un inventario diamétrico pie a pie y se apearon una serie de árboles para poder estimar el peso de la biomasa a triturar. En la siguiente figura se presenta la distribución diamétrica de la chopera expresada en pies/hectárea. El diámetro medio de la masa era de 27 cm, concentrándose más del 80 % en el rango de 15 a 35 cm.



Figura 139: Distribución diamétrica de la chopera de Velamazán.

De entre los árboles de la chopera, se apearon 10, cubriendo el rango entre 15 y 45 cm., de los que se pesaron las ramas. Dentro de las ramas, se distinguió entre la fracción que no se puede aprovechar como leña, a partir de diámetros inferiores a 5 cm, y la parte que si se puede aprovechar como leña, ramas entre 5 y 12 cm. de diámetro. Con estas dos fracciones se ajustaron unas ecuaciones con las que se elaboró la *Tabla XX*.

Con esta tabla y la distribución diamétrica, **se ha estimado que la cantidad biomasa a extraer habría sido de 22,16 t/ha si sólo se extrajeran las ramas y de 37,47 t/ha en caso de aprovechar como biomasa para trituración también la parte de leña.**

Este peso por hectárea es bastante bajo si se compara con la cantidad de restos de corta que se pueden aprovechar como biomasa en otras choperas en el momento de su aprovechamiento, obtenido en las experiencias que se han descrito en los apartados previos (entre 50 y 70 t/ha solo las ramas, sin la leña). Esto se debe a que la calidad de esta chopera era bastante mala y las copas no presentaban ramas muy gruesas. Una baja densidad de restos influye de manera directa en el rendimiento del sistema productivo y por lo tanto en los costes del aprovechamiento.

C.D. (cm)	Peso ramas (kg)	Peso ramas más leña (kg)		Peso (t)	% sobre peso total
15-20	32,6	34,8			
20-25	52,3	64,7	Desenrollo	1337	68,0%
25-30	76,2	105,9	Sierra	0	0,0%
30-35	104,3	159,8	Leña	360	18,3%
35-40	136,5	227,2	biomasa	268	13,6%
40-45	172,8	309,1			
45-50	212,9	406,4	TOTAL	1965	100
50-55	257,0	519,9			

Tabla XX: Peso de las ramas y las leñas por clases diamétricas en la chopera de Velamazán.

Tabla XXI: Relación de los diferentes productos que se extrajeron de la chopera de Lubia.

6.10.4.2. – Resultados de la estimación de producción en la experiencia de Lubia

En este caso, no se pudo contar con los datos de un inventario previo, pero después del aprovechamiento, los datos facilitados por la empresa se utilizaron para tener una idea de la madera y la biomasa que se extrajo de esa chopera, como se refleja de modo resumido en la *Tabla XXI*. La relación entre biomasa astillada y triturada se presenta en la *Tabla XXII*.

	Vol (estéreos)	Nº camiones	Peso (t)	Densidad (t/est)
Astillado	770	15	216,2	0,28
Triturado	200	4	52,08	0,26
TOTAL	970	19	268,28	0,28

Tabla XXII: Volumen astillado y triturado en la chopera de Lubia

	Peso (t)	% sobre peso total
Desenrollo	4523	71,83
Sierra	287	4,56
Leña	867	13,77
biomasa	620	9,85
TOTAL	6297	100,01

Tabla XXIII: Relación de los diferentes productos que se extrajeron de la chopera de Viana de Duero.

Las toneladas de biomasa aprovechadas por hectárea fueron 268 t / 5,4 ha = **49,63 t/ha**. Este peso por hectárea, teniendo en cuenta que se aprovechó el puntal o leña por separado, es bastante elevado, pero se debe tener en cuenta que esta chopera tenía una madera de muy mala calidad (extramadura, muchos árboles con pudriciones que no tuvieron aprovechamiento maderable...), por lo que muchas trozas que no fueron aptas para su aprovechamiento como madera o leña quedaron en el terreno para ser astilladas.

6.10.4.3. Resultados de la estimación de producciones en Viana de Duero

Como en el caso de Lubia, no se pudo realizar un inventario previo, pero se dispone de los datos de la madera que se extrajo de la chopera, distribuida por destinos (*Tabla XXIII*):

Las toneladas de biomasa por hectárea aprovechadas son; $620 \text{ t} / 31,84 \text{ ha} = \mathbf{19,47 \text{ t/ha}}$. En este caso, la densidad de biomasa en toneladas por hectárea fue muy baja, influyendo negativamente en la viabilidad económica del aprovechamiento de biomasa.

6.10.5. Resultados de los estudios sobre apeo y elaboración

6.10.5.1. Estudio del trabajo en el apeo y elaboración de árboles con motosierra en la chopera de Velamazán

En esta chopera se ha llevado a cabo un apeo manual con motoserrista, que apeaba una serie de árboles de una misma fila, y a continuación los retestaba y desramaba.

El pliego de condiciones establecía que la adjudicación del aprovechamiento de esta chopera era a liquidación final con contada en blanco de los árboles. Esto supone que, una vez apeados y desramados los árboles, estos debían quedar en una fila para su medición. El operar de la cuadrilla se complicaba mucho por el hecho de que primero tuvieran que dejar los árboles desramados, tumbados en el suelo sin apilar, para cubicarlos, y sólo después se pudiesen tronzar y apilar.

Los destinos de la madera fueron los siguientes: las trozas más gruesas se destinaron para desenrollado y sierra, y las puntas y ramas más finas (desde 12 hasta entre 5 y 7 cm en punta delgada), para madera de trituración. Durante el apeo de esta chopera se llevó a cabo un cronometraje discontinuo del motoserrista apeando y desramando los árboles. Se probaron dos métodos de trabajo para comparar rendimientos, en función del destino que se le fuesen a dar a las fracciones más finas del árbol. Por un lado, la manera de operar propia de la cuadrilla desramando todo el fuste hasta 5 cm en punta delgada, pero también se les propuso dejar de desramar desde 12 cm y destinar la troza de trituración a su astillado en monte con el resto de las ramas.

El hecho de no desramar toda la copa de las ramas finas incrementó el rendimiento de la astilladora, puesto que al estar todo en la misma punta y no desramado en fracciones pequeñas, se facilita la alimentación de la astilladora, además de aportar la troza que en el otro caso iría a trituración.

Por otro lado, el no aprovechar la troza de trituración, con el tiempo que conlleva desramar y tronzar esta troza, también aumentará el rendimiento de la cuadrilla encargada de apeo los árboles en el procesado de las trozas de mayor valor.

El rendimiento medio del motoserrista apeando y desramando árboles es el que se ve reflejado en la *Tabla XXIV*.

Aunque el tiempo de cronometraje fue insuficiente para valorarlo de forma fiable, se observó que el tiempo dedicado a apeo y desramar hasta 5 cm en punta delgada fue mayor que si sólo se desramaba hasta 12 cm (1,81 min/árbol frente a 1,69 min/árbol). Además, se debe tener en cuenta que, a la hora de tronzar posteriormente el árbol, también se ahorra el tiempo de procesar y apilar la última troza.

MOTOSERRISTA VELAMAZAN			T (%)			Producción (pies/hora)		
T. trabajo	Productivo (directo)	Despl	11,11	85,86	94,95	Tiempo productivo 33,88	Tiempo de trabajo 30,64	Tiempo de presencia 29,09
		Apeo	21,21					
		Desramado	46,46					
		Retestado	7,07					
	Indirecto	Afilar	6,06	9,09				
		Repostar	3,03					
T. no operativo	Interrupción		5,05	5,10	5,15			
			100	100	100			

Tabla XXIV: Rendimiento del motoserrista en el apeo y desramado de árboles en Velamazán.

6.10.6. Astillado y trituración de restos de corta

6.10.6.1. - Estudio del trabajo de astillado en Luvia y Viana de Duero

La astilladora únicamente se utilizó en Luvia de manera continuada, y en Viana de Duero solo se utilizó para probar su rendimiento. En Luvia, la astilladora trabajaba en móvil y descargaba sobre el remolque de un tractor que iba paralelo a ella, mientras que en Viana se trataba de astillado fijo, descargando directamente las astillas al suelo.

En las siguientes tablas IUFRO (Tablas XXV y XXVI) aparece el tiempo que la máquina empleaba en cada operación durante el tiempo de trabajo y el rendimiento de la astilladora en estas choperas

El rendimiento de la astilladora fue muy bajo en las dos choperas: 2,28 t/hora sobre tiempo productivo y 1,30 t/hora sobre tiempo de presencia en Luvia y 1,95 t/hora productiva y 1,85 t/hora de presencia en Viana de Duero. En experiencias similares de astillado de restos en choperas con astilladoras de poca potencia y sin motor propio acopladas a la toma de fuer-

LUBIA				T (%)				Producción (t/h)		
T. trabajo	Productivo (directo)	Principal	Mov. Grúa	6,22	43,52	56,99	63,73	Tiempo productivo 2,28	Tiempo de trabajo 2,07	Tiempo de presencia 1,3
			Alimentación y empuje	27,46						
			Colocación carga suelo	9,84						
		Comple- mentario	Despla. tractor	3,11	13,47					
			Espera alimentación	10,36						
		Indirecto	Calentamiento inicial/Apaga	3,63	6,74	6,74				
	Reparación, mantenimiento		3,11							
	T. no operativo	Espera de otros elementos del sistema		13,47						
	Desplazamiento del remolque (ir a descargar y volver)		22,28	35,75	35,75	35,75				
	Ninguna		0,52	0,52	0,52	0,52				
Total			100	100	100	100				

Tabla XXV: Rendimiento de la astilladora en Luvia

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

VIANA DE DUERO (ALMAZÁN)				T (%)				Producción (t/h)		
T. trabajo	Productivo (directo)	Principal	Mov. Grúa	16,07	78,57	93,75	96,43	Tiempo productivo 2,28	Tiempo de trabajo 2,07	Tiempo de presencia 1,3
			Alimentación y empuje	53,57						
			Colocación carga	8,93						
		Comple- mentario	Despla. tractor	10,71	15,18					
			Espera alimentación	4,46						
		Calentamiento	0,00	2,68	2,68					
Indirecto	Separación	2,68								
T. no operativo	Espera de otros elementos del sistema			1,79	1,79	1,79	1,79			
	Ninguna			1,79	1,79	1,79	1,79			
	Total				100	100	100	100		

Tabla XXVI: Rendimiento de la astilladora en Velamazán.

za de un tractor, el rendimiento registrado en ocasiones previas había sido más del doble: 5,69 t/hora productiva y 3,34 t/hora de trabajo (Garoz, 2009).

Un rendimiento tan bajo estuvo muy condicionado por las siguientes deficiencias:

- La **falta de experiencia del operario** en el caso de Lubia. Aunque familiarizado con este tipo de maquinaria, era la primera vez que utilizaba esta astilladora puesto que la acababan de contratar en régimen de alquiler con opción a compra.
- **El hecho de que los restos no estuviesen acordonados**, que disminuyó el rendimiento de la astilladora puesto que se empleaba más tiempo en agruparlos con la pinza para alimentarla. Este hecho se refleja en que se dedicaba un 9,84% del tiempo en Lubia y un 8,93% en Viana de Duero en la operación “*colocación carga en el suelo*” que consistía en las operaciones que tiene que hacer el operario con la pluma para reunir un montón de restos para depositarlos sobre la bandeja de alimentación.
- La operación “*espera alimentación*”, que es el tiempo que el operario debe esperar una vez que había dejado la carga sobre la bandeja de alimentación hasta que el material iba siendo tragado por el tambor de la astilladora, ocupó un 10,36% del tiempo total, debido a **la escasa potencia del motor para este tipo de material en Lubia**. En Viana de Duero, esta operación sólo ocupó un 4,46% del tiempo total, puesto que los restos eran más finos y estaban más secos, por lo que la astilladora no tenía tanto problema para tragar el material.
- Los restos a triturar tenían un **contenido en humedad demasiado elevado**, ya que durante el control de los trabajos y los días anteriores había estado lloviendo. Por este motivo, la salida de la cañonera se quedaba obstruido con facilidad, ya que tenía poca fuerza para expulsar el material triturado y este taponaba la salida.
- Como se ha comentado anteriormente, **la astilladora en Lubia esperaba mientras el remolque iba a descargar y volvía**, lo que suponía un 22,28 % del tiempo total de trabajo. El rendimiento en Viana de Duero es algo mayor que en Lubia sobre el tiempo total. Esto mayor rendimiento se debe en parte a que al astillar directamente al suelo no tenía que esperar los viajes del remolque como en el caso de Lubia.

6.10.6.2. - Estudio del trabajo de triturado en Velamazán y Viana de Duero

En las choperas de Velamazán y Viana de Duero, los restos se trituraron con la trituradora de martillos. En Viana de Duero (*Figura 140*), la cinta transportadora de la trituradora descargaba al suelo, mientras que en Velamazán (*Figura 141*), lo hacía sobre un camión que hacía las veces de remolque y que transportaba la astilla a un cargadero desde donde ésta era cargada de nuevo y transportada a destino.



Figuras 140 y 141: Trituradora en Viana de Duero (izquierda) y alimentación de trituradora con una retroexcavadora en Velamazán (derecha).

En las siguientes Tablas IUFRO (*Tablas XXVII y XXVIII*), se presenta de forma resumida el rendimiento de la trituradora y la distribución de tiempos dedicados a cada operación.

VELAMAZÁN				T (%)				Producción (t/h)		
T. trabajo	Productivo (directo)	Principal	Despl. grúa	5,28	19,35	35,78	88,56	Tiempo productivo	Tiempo de trabajo	Tiempo de presencia
			Alimentación	9,38						
			Colocación bandeja	4,69						
		Comple- mentario	Despla. tractor	9,97	16,42	10,86				
			Espera alimentación	2,64						
			Colocación suelo	3,81						
	Calentamiento			0,29			4,39			
	Indirecto	Reparación pequeña		0,29	52,79	52,79				3,89
		Carga camión		29,91						
		Desalojar la cinta de		2,64						
		Viaje remolque		19,06						
		Preparación		0,59						
T. no operativo	Espera de otros elementos del sistema		10,26	11,44	11,44	11,44				
	Ninguna		1,17							
Total				100	100	100	100			

Tabla XXVII: Distribución de tiempos y productividad de la trituradora en Velamazán.

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

VIANA DE DUERO (ALMAZÁN)				T (%)				Producción (t/h)		
T. trabajo	Productivo (directo)	Principal	Despl. grúa	9,13	32,93	49,04	95,67	Tiempo productivo 16,46	Tiempo de trabajo 8,43	Tiempo de presencia 8,06
			Alimentación	16,11						
			Colocación bandeja	7,69						
		Comple- mentario	Despla. tractor	6,49	16,11					
			Espera alimentación	3,85						
			Colocación suelo	5,77						
	Indirecto	Calentamiento	1,44	46,63	46,63					
		Preparación	45,19							
T. no operativo	Espera de otros elementos del sistema			4,09	4,33	4,33	4,33			
	Ninguna			0,24						
Total				100	100	100	100			

Tabla XXVIII: Distribución de tiempos y productividad de la trituradora en Viana de Duero.

El rendimiento en Velamazán fue de 12,55 t verdes/hora productiva y de 3,22 t verdes/hora de presencia, mientras que en Viana de Duero fue de 16,46 t/hora y 8,08 t/hora, productiva y de presencia respectivamente.

El rendimiento fue mucho menor en Velamazán que en Viana de Duero. El motivo principal fue el sistema organizativo del trabajo, ya que existen muchos tiempos muertos en espera de que el remolque fuese a descargar el material.

Bien es cierto que tanto la astilladora como la trituradora eran máquinas muy viejas, y sufrían problemas de sobrecalentamiento. Por este motivo, al operario no le importaba tener tantos tiempos muertos y aprovechar así para dejar que las máquinas se refrigerasen.

La relación de tiempo de trabajo productivo sobre tiempo de presencia no llegó al 50% en Viana, y fue de tan solo el 36% en Velamazán. En otros estudios parecidos con astilladoras de elevada potencia y con trituradoras, el porcentaje de tiempo de trabajo productivo sobre tiempo total se encuentra en la horquilla entre el 55 y el 65%. Esto afecta de manera directa sobre el rendimiento, y para superar este problema hay que centrarse en los aspectos organizativos, es decir, planificar el trabajo para que los tiempos muertos de las máquinas protagonistas del sistema, la astilladora y la trituradora, sean los mínimos posibles.

En la siguiente *Figura 142*, se representa el porcentaje de tiempo dedicado a cada operación en las dos choperas.

- En Viana, la fracción de tiempo indirecto fue muy elevada debido a una avería que hubo que reparar.
- En Velamazán, debido al sistema de trabajo, hay dos operaciones que no aparecen en la otra choperas, la carga del camión y la espera mientras el remolque va a descargar, que suman casi un 50 % del tiempo total.
- La carga del camión es una operación que se llevaba a cabo en los dos casos, pero en la choperas de Velamazán el operario de la trituradora dejaba su alimentación para ir a cargar los camiones, mientras que en Viana era otro operario el que realizaba esta tarea y la trituradora seguía trabajando.
- El tiempo muerto que supone esperar el viaje del remolque fue de casi el 20% del total.

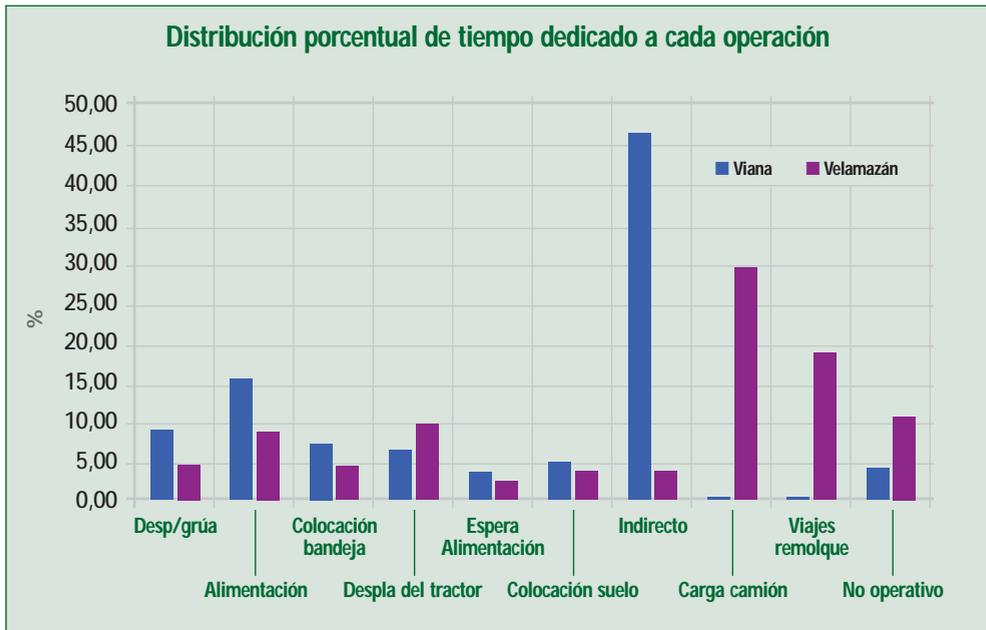


Figura 142: Comparación de la distribución de tiempos dedicados a cada operación en el trabajo de la trituradora en Viana de Duero y Velamazán.

En este análisis de la distribución de tiempos, queda evidenciado que una mala organización del sistema de trabajo repercute directamente en un aumento considerable de tiempos muertos en el trabajo de la trituradora, por lo que el rendimiento del sistema disminuye de manera muy notable.

6.10.7. Estudio del trabajo de acopio de restos

En estos dos últimos casos, mientras la trituradora trabajaba la cargadora telescópica “Manitou” iba reagrupando la biomasa que se encontraba repartida por toda la chopera, bien en pequeños montones o bien acordonada. El rendimiento de la Manitou realizando esta tarea era sólo entre 0,3 y 0,4 ha/ hora, lo que equivaldría a 6 a 9 t verdes/hora en las choperas de Viana de Duero y Velamazán, respectivamente.

En la práctica, este rendimiento se veía muy disminuido porque realizaba otras tareas al mismo tiempo: retirar la biomasa triturada de la zona de desahogo de la cinta transportadora, mover la trituradora cuando hacía falta, y sobre todo, acercar la ramera donde la retroexcavadora pudiera cogerla, ya que ésta trabajaba en fijo y sólo podía coger lo que estuviera al alcance del brazo de su grúa.

Al tratarse de un acopio relativamente lento, en ocasiones el sistema de trabajo se veía ralentizado porque la retroexcavadora no tenía restos a su alcance para alimentar a la trituradora, lo que disminuía su rendimiento.

Para mejorar la organización del sistema, se pueden plantear las siguientes opciones:

- Añadir un operario más, de manera que uno estuviera trabajando en la retro alimentan-

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

- do a la trituradora, otro en una Manitou acopiando la biomasa y un tercero con otra cargadora realizando labores complementarias (mover la trituradora, acercarle biomasa bruta a la retro y cargar los camiones que transportan la biomasa triturada a central).
- Adelantar el trabajo de la Manitou y que fuera acopiando biomasa unos pocos días antes, dependiendo de la superficie de la chopera, empezando por las partes más alejadas de los puntos donde vaya a estar trabajando la trituradora para que, en caso de continuar acopiando cuando la trituradora haya comenzado a trabajar, solo tuviese que traer la biomasa de zonas cercanas.

6.10.8. Costes

En la siguientes *Tablas XXIX* y *XXX* se presentan los costes de astillado y triturado de los sistemas de trabajo estudiados.

ASTILLADO sin acordonamiento de restos			
	Coste horario (€/h)	Rendimiento (t/h)	Coste unitario (€/t)
Astilladora	60	2,07	45,89
Tractor con remolque	35		

TRITURADORA con apilado de restos			
	Coste horario (€/h)	Rendimiento (t/h)	Coste unitario (€/t)
Trituradora	95	8,43	18,98
Retroexcavadora alimentación	35		
Manitou acopio	30		

Tabla XXIX: Costes del astillado de restos.

- Estos valores son el coste directo de la tonelada de astilla verde puesta en cargadero, sin incluir los costes indirectos y de estructura y el beneficio industrial (15% y 12% respectivamente), además de los costes fijos de explotación que supone el traslado de las máquinas al lugar del aprovechamiento o el posible pago a la propiedad por la materia prima.
- Los costes horarios de la astilladora, la trituradora y la retroexcavadora pueden resultar bajos en comparación con otras máquinas de estas características, pero se debe tener en cuenta que son máquinas muy viejas, con muchas horas de trabajo en las que no se tiene en cuenta la amortización de las máquinas.
- El coste de la tonelada de astilla elaborada por la astilladora en estas experiencias (45,89 €/t) resulta absolutamente inasumible teniendo en cuenta que en una central de consumo se pagan entre 45 – 50 € la tonelada verde.
- Como se ha visto en los apartados precedentes, otras experiencias con astilladoras de estas características, pero con máquinas en mejores condiciones y un mejor sistema de trabajo, redujeron el coste de la tonelada de astilla verde al orden de 35 €/t.

- En el caso del material triturado, este sí puede encontrarse dentro de la rentabilidad. Dependerá del tamaño de la chopera (a mayor tamaño de chopera, menor coste de explotación a imputar sobre la tonelada de astilla) y de la distancia de transporte al centro de consumo.

6.11. Comparación de la calidad de las biomásas producidas

Se procede en este apartado a comparar el material producido por la astilladora con el producido por la trituradora. En el caso de la astilladora Jenz, con un tambor con 8 cuchillas y trabajando a un régimen elevado de revoluciones, producía una astilla homogénea con un tamaño menor de 30 mm. La trituradora producía un material más heterogéneo, con un tamaño de material entre 90 y 150 mm; al producirse la rotura por golpeteo y no por corte como en la astilladora, el producto resultante es muy fibroso y con claro predominio de una dimensión sobre las otras (partículas muy alargadas), como se puede apreciar en las *Figuras 143 y 144*.



Figuras 143 y 144: Material astillado (izquierda) y triturado (derecha).

A pesar de ser de mejor calidad el material astillado, en ambos casos el material resultante contenía una alta proporción de finos (partículas menores de 3 mm.), lo cual puede ser un inconveniente para ciertos tipos de calderas.

6.12. Conclusiones de las experiencias principales (Sistemas 1-3)

6.12.1. Respecto al recurso en Castilla y León

- En Castilla y León, en la actualidad hay casi 90.000 ha dedicadas al aprovechamiento intensivo de choperas, de las que se extraen anualmente 700.000 m³ de madera.
- Se calcula que la biomasa a extraer proveniente de los restos de corta de choperas está entre 70 y 100 t/ha. Potencialmente, supone 83.000 y 120.000 t/año de astilla completamente verde sólo en la Comunidad de Castilla y León.

6.12.2. Respecto a la planificación previa (selección del lugar, localización del cargadero, etc.)

- En cuanto a la elección de la tecnología a utilizar, se recomienda **astilladoras de tambor frente a las de disco**, puesto que producen una astilla más fina y homogénea.
- **Las trituradoras** sólo son justificables ante la certeza de la existencia de abundantes impurezas de piedra o arena abrasiva.
- El **rendimiento de la astilladora está relacionado con su potencia**, si bien para su elección se debe valorar el consumo de combustible y el coste unitario final de la tonelada de astilla. Si no se está seguro de disponer de tajo abundante durante todo el año, y para superficies de choperas pequeñas (menos de 2 ha), es preferible usar astilladoras de menor potencia.
- **El cargadero de astilla** se colocará dentro de la misma choperas cuando esta sea accesible para los camiones que vayan a cargarla y el terreno sea estable y no susceptible de encharcarse en la época de trabajo. En caso de no ser así, se buscará un emplazamiento próximo a la choperas sobre un suelo asfaltado o con solera de hormigón.
- **En cuanto a la superficie necesaria para el cargadero**, se necesitan **5 m² de superficie por tonelada de astilla**, suponiendo que el montón de astilla alcanza una altura máxima de 2,5 a 3 metros de altura. Por ejemplo, suponiendo una choperas de 2,5 ha, con una densidad de restos de 80 t/ha, se extraen 180 toneladas de astilla (con una eficiencia en la extracción de restos del 90%). Entonces se necesitará una superficie mínima de 900 m² en caso de que los camiones no vayan a cargar las astillas hasta después de terminados los trabajos.
- En cuanto a **dónde se deposita la astilla según sale por la cañonera**, se plantean varias opciones: que la astilladora tenga su propia tolva acoplada, que descargue sobre un remolque auxiliar o que descargue directamente sobre el contenedor del piso móvil que va a transportar la astilla a su destino final.
- **Cuando sea posible astillar sobre el contenedor de piso móvil se elegirá esta opción**, puesto que al no tener que tirar la astilla al suelo en cargadero esta tendrá menos impurezas y además se evita introducir la pala cargadora en el sistema para la carga de los camiones.
- En caso de no ser posible la opción anterior, el sistema a elegir será el que produzca menos tiempos muertos de la astilladora, que es la máquina con mayor coste horario del sistema.

6.12.3. En cuanto al apeo, desramado y movimiento de fustes

- Desde el punto de vista del aprovechamiento de biomasa, **es preferible el apeo manual** seguido del **acordonamiento con grapa o tractor con rastrillo u horquilla**, ya que de esta manera el acordonado de los restos se integra con las operaciones de aprovechamiento de madera, de forma que se favorece que las ramas lleven una menor cantidad de piedras y tierra.

- Cuando el apeo y desramado sea **con cosechadora**, esta no tiene la posibilidad de acordonar los restos, pero **debe dejarlos a un lado de la calle para no pasar por encima de ellos**.
- Durante el apeo manual, **el motoserrista debe tirar los árboles en la misma dirección**, para que cuando la grapa recoja los fustes no pase por encima de los restos de corta.
- Es preferible de **dejar el rabeón completo a partir de 10-14 cm de diámetro, para su astillado, porque se incrementa la producción total de biomasa pero también la eficacia en su alimentación**.

6.12.4. Sobre la elaboración de los cordones de astillado

- El objetivo de acordonar los restos es que la astilladora se alimente de la forma más eficiente posible y con el menor número de desplazamientos.
- **Para garantizar el cuidado en estas operaciones, lo ideal es que la empresa que se encargue del aprovechamiento de la madera sea la misma, o por lo menos esté coordinada con la que efectúe el astillado.**
- Los restos **no deben ser arrastrados** por el suelo para evitar incorporar tierra y piedras, para ello, el apero que se utiliza para acordonar, ya sea la grapa (acoplada a una pala cargadora frontal, con dos travesaños) o la horquilla (acoplada a un brazo telescópico y con mayor número de travesaños, entre 4-8) debe elevarse unos decímetros para evitar el arrastre, y moverlos la menor distancia posible.
- En las experiencias estudiadas, el rendimiento del rastrillo -0,12 ha/hora de trabajo- es algo menor que las 0,17 ha/hora de trabajo de la grapa (que, además, compacta más los restos en el cordón), pero la recogida es más eficaz con el rastrillo, en cuánto al porcentaje residuos que recoge al tener una separación menor entre travesaños.
- La idea del rastrillo con un hueco para poder pasar a través de una fila de tocones facilita mucho las labores de acordonado, y previene el problema de romper alguna de sus barras.
- **Para un aprovechamiento mecanizado con procesadora, cabe plantearse incorporar el rastrillo al sistema de trabajo** para dejar los restos acordonados y mejorar así el rendimiento de la astilladora. La ventaja frente al acordonado previo que se realiza en el apeo manual es que se dispone de esta máquina en el tajo al mismo tiempo que la astilladora, para ayudarla en la recogida de restos.
- **Los cordones deben ser lo más largos que sea posible y sin superar nunca la altura de la cabina del gruista de la astilladora**, y distribuidos de manera que se minimicen los desplazamientos de la astilladora de uno a otro cordón.
- **En cuanto a la superficie que ocupan los cordones:** La grapa permite comprimir los restos con la pinza por lo que la superficie que ocupa el cordón de restos es menor. Se estima que la superficie necesaria para acordonar los restos con la grapa es de 19 m² por tonelada de restos, que, para una altura media de cordón de 2 metros, equivale a 38 m³ aparentes, mientras que con el rastrillo, la superficie necesaria para acordonar los restos es algo más del doble, 38,8 m² por tonelada de restos y 77,5 m³ aparentes para 2 metros de altura media de cordón.

6.12.5. En cuanto al astillado de restos

- En los estudios llevados a cabo con la **astilladora Pezzolato** acoplada a un tractor de **215 CV** del sistema 1, el rendimiento fue de **5,69 t/hora**. Se registró un rendimiento de **16,19 t/hora** sobre tiempo productivo para la **astilladora Erjo de 588 CV**, en el sistema 2 y de **11,21 t/hora** en el sistema 3. Esta última diferencia de rendimiento para la misma máquina se puede explicar por el hecho de que, en el primer lugar, los restos estaban acordonados y la chopera no presentaba condiciones que dificultasen el trabajo de la astilladora como en el segundo lugar, donde los restos estaban agrupados en pequeños montones pero no acordonados, y la chopera estaba atravesada por numerosos surcos.
- **En cuanto al equipo tractor o tren de rodaje de la astilladora.** Si el acceso lo permite, se puede montar la astilladora sobre camión. Sino, se opta por una astilladora sobre autocargador o con tren de rodaje de oruga que no tendrá problemas para acceder ni para circular por la chopera pero su necesidad de transporte independiente origina problemas logísticos especialmente si se usa en montes pequeños repartidos por un área extensa.
- **Las pinzas de la grúa de la astilladora** deben tener mayor capacidad que las que utilizan habitualmente para manejar la madera.
- El **brazo de la grúa** de la astilladora debe ser lo más largo posible.
- **La mesa de alimentación** debe ser lo más ancha y larga posible para poder depositar los restos sobre ella con facilidad, pero no demasiado porque en ese caso la máquina tiene que estar más alejada del cordón por lo que se limita el alcance de la grúa.
- **Si la astilladora se coloca perpendicular al cordón, aumenta su rendimiento** al facilitar su alimentación, aunque luego tenga que perder tiempo en maniobrar hasta la siguiente posición.
- **No tiene sentido intentar recuperar el 100% del material acordonado**, es mejor dejar algo de restos en el terreno que perder productividad global y aumentar las impurezas en el material.
- Los restos de la parte más baja de la pila son los que se astillan más despacio, porque en cada viaje la grúa carga menos y debe extremar la precaución para no arrastrar piedras. Por eso, la posibilidad de ir **reagrupando los restos de la parte más baja del cordón con el rastrillo** resulta interesante y, en cualquier caso, no es recomendable apurar por encima de cierto límite, aunque parte de la biomasa pueda quedar en el terreno.
- Cuando la astilladora descargue sobre un remolque tirado por otro tractor, este debe estar atento para desplazarse según la astilladora avance a lo largo del cordón sin producir demoras en el trabajo.
- **Durante la alimentación, especialmente si se aprecia o sospecha la presencia de piedras, es importante sacudir el fajo de ramas con la pinza para propiciar que las piedras se desprendan.**

6.12.6. Respecto a los condicionantes medioambientales

- Para evitar los efectos desfavorables debidos a la extracción de nutrientes, es preferible llevar a cabo las cortas antes de la foliación de los chopos.

- En las choperas, el turno habitual de corta, entre 14-16 años es suficientemente largo para que la extracción de la biomasa no sea crítica en cuanto a la pérdida de fertilidad del suelo puesto que esta parcialmente equilibrada por el desfronde a lo largo de la vida de la chopera. Además, los terrenos donde se suelen plantar no son especialmente sensibles ante este hecho.
- Se considera conveniente dejar secar la biomasa en la chopera antes de su extracción.

6.12.7. Respecto a la seguridad y salud

- Los operarios deben conocer las normas de seguridad y salud concernientes a su puesto de trabajo para garantizar la seguridad y salud y respetarlas. Además deben utilizar siempre y correctamente los E.P.I.s preceptivos.

6.12.8. Respecto a la calidad de la astilla

- La calidad de la biomasa (astillas) está relacionada con su granulometría relativamente fina y homogénea, con su humedad lo más reducida posible, con el mínimo porcentaje de impurezas no orgánicas –piedras, arena, piezas metálicas u otras– y con el menor contenido posible de cenizas, y particularmente de álcalis que dan lugar a problemas de sinterización en las calderas. En ese sentido, los consumidores más exigentes –pequeñas calderas de aplicaciones térmicas–, requerirán astillas con la mayor proporción de madera y menor de corteza, ramillas y hojas, que sea posible. Estas circunstancias pueden condicionar fuertemente la forma de ejecución y la logística de los aprovechamientos.
- **La astilla de chopo** es de la mejor calidad respecto a la densidad energética según la clasificación finlandesa y presenta **un contenido energético medio de 1,37 MWh/m³**.
- Para obtener una mejor calidad de astilla, es preferible que los restos se astillen sin hojas, ya que estas aumentan el contenido de cloro y azufre de la astilla, además del contenido en cenizas. Por lo tanto es preferible realizar el aprovechamiento antes de la foliación, o en caso de no ser posible dejar secar los restos lo suficiente para que caiga la hoja de manera que se extraigan menos nutrientes del terreno.

6.12.9. En cuanto a los costes del aprovechamiento

- En las experiencias estudiadas, **el coste de elaboración de la astilla varía desde los 20,85 €/t para la astilladora Erjo, a los 34,63 €/t para la Pezzolato de menor potencia**. A estos costes falta añadirles los costes fijos de explotación, los costes generales de estructura, el beneficio industrial y el coste del transporte.
- Cuanto menor sea la distancia de transporte, lógicamente menor será el coste que se le tenga que imputar a la tonelada de astilla en este concepto. Para una distancia de 25 km, el coste de transporte es de 7,11 €/t, para 200 km, este se elevaría a 15,93 €/t, lo que supondría un 75 % sobre el coste de elaboración. Para distancias demasiado largas, el coste del transporte puede suponer un porcentaje demasiado elevado del coste de manera que haga económicamente inviable el suministro.

- Los costes finales estimados para una distancia de transporte de 100 km, para una astilladora potente que requiriera de una góndola para su transporte, incluyendo un 12% de beneficio industrial y un 15% de costes indirectos y de estructura, pero sin pagar por los propios restos, se estima en 43,5 € por tonelada verde.

6.13. Conclusiones de las experiencias complementarias en la comarca de Almazán

6.13.1. En cuanto a la maquinaria utilizada

- En las experiencias estudiadas, se ha optado por la utilización de **máquinas de segunda mano con muchas horas de vida, en régimen de alquiler**.
- En el caso de la **astilladora**, la máquina tenía una **potencia claramente insuficiente** y se encontraba totalmente obsoleta, con más de 15.000 horas de trabajo. Esta máquina tiene un coste horario mucho menor que una máquina nueva de similares características, pero **su rendimiento es tan bajo que no resultó rentable**.
- La **trituradora**, con más de 5.000 horas trabajadas, sí respondía bien y **con una potencia adecuada, obteniéndose rendimientos aceptables**.
- La retroexcavadora, con “más de 30 años de vida”, era una máquina viejísima y el empresario la utilizaba únicamente de manera temporal hasta poder disponer de otra más moderna. La alimentación de la trituradora con esta máquina no fue eficaz, puesto que no pudo empujar bien los restos hacia el tambor de la trituradora.

6.13.2. En cuanto a la cantidad de biomasa

- Las choperas de **Velamazán y Viana de Duero** tenían una **densidad de biomasa en toneladas por hectárea, bastante bajo para que su astillado resulte rentable** (22,16 t/ha y 19,47 t/ha respectivamente). En estas choperas sólo se astillaron las ramas más finas que no podían ser aprovechadas para leña. Además, estas choperas eran de baja calidad y no tenían una copa densa, es decir, tenían pocas ramas y éstas eran de diámetros pequeños.
- En la chopera de **Lubia**, la **cantidad de biomasa era mucho más elevada**, 49,63 t/ha. En esta chopera también se aprovecharon las leñas, pero al tratarse de una chopera muy pasada de turno (con 28 años), tenía muchos árboles podridos cuya madera también se trituró.
- En choperas de buena calidad, el peso de la biomasa es mucho mayor; entre 50 y 70 t/ha si se dejan solo las ramas y entre 70 y 100 t/ha si también se deja el puntal o leña, según se ha estimado en las experiencias principales descritas con anterioridad dentro del presente capítulo 6. Para que el aprovechamiento de biomasa resulte rentable, debe haber al menos entre 40 – 50 t/ha (Sydved, 2005).

6.13.3. En cuanto al aprovechamiento del puntal o leña

- Si la fracción de madera que normalmente se destina a leña o madera de trituración se deja para triturar en campo, el rendimiento de la astilladora o trituradora

dora aumenta notablemente, puesto que además de disponer de restos más gruesos, la alimentación es más fácil.

- Durante el estudio no se ha podido evaluar el tiempo que se ahorran las cuadrillas que sacan la madera si no tienen que desramar esa parte de la copa ni cortar esa troza. Habría que tener en cuenta, además de la diferencia en costes de elaboración y astillado, la diferencia del precio de la madera de trituración y el de la astilla, combinada con el coste de desramarla y triturarla o simplemente astillarla en campo.

6.13.4. En cuanto al rendimiento de la astilladora

- **El rendimiento registrado de las astilladoras trabajando sobre material no acopiado ha resultado demasiado bajo** para resultar rentable: 2,28 t/hora en Lubia y 1,95 t/hora en Viana de Duero, en ambos casos sobre tiempo productivo. En experiencias similares de astillado de restos en choperas con astilladoras de poca potencia y sin motor propio acopladas a la toma de fuerza de un tractor, el rendimiento resultó de más del doble (5,69 t/hora sobre tiempo productivo, según Garoz –2009–).
- Los **factores** que influyeron de manera más directa sobre el bajo rendimiento de esta máquina fueron:
 - El enorme **tiempo de espera mientras que el remolque** sobre el que expulsaba la astilla la cañonera de la astilladora **iba a descargar y volvía**, casi un 25% del tiempo total de trabajo, **además del hecho de que los restos no estuviesen acordonados**,
 - **La falta de potencia de la máquina**, que aunque estaba acoplada a un tractor de 190 CV, no podía trabajar con suficiente potencia en un régimen adecuado de revoluciones.
 - **En menor medida, la falta de experiencia del operario** en el manejo de la grúa y **el alto contenido de humedad y gran cantidad de barro que iba mezclada con la astilla en el caso de Lubia**, que provocaba que en ocasiones la cañonera de la astilladora se atascase.

6.13.5. En cuanto al rendimiento de la trituradora

- **El rendimiento de la trituradora en Velamazán fue de 12,55 t/hora productiva y en Viana de Duero, de 16,46 t/hora productiva**. Estos rendimientos son similares a los de una astilladora de gran potencia (350-400 CV) trabajando en una choperas de similares características, en los estudios previos sobre los aprovechamientos ejecutados por Granica Plywood.
- **El rendimiento sobre tiempo de presencia en Velamazán es bastante menor** que en Viana de Duero debido principalmente al sistema organizativo, ya que en Velamazán **la trituradora descargaba sobre un contenedor y había muchos tiempos muertos en espera de que éste fuera a descargar** el material.
- **La relación de tiempo de trabajo productivo sobre tiempo de presencia no llega al 50% en Viana, y es de tan solo el 36% en Velamazán**. En otros estudios parecidos con astilladoras de elevada potencia (Véase los estudios de los aprovechamientos ejecutados por Garnica Plywood en apartados precedentes) y con trituradoras (capí-

El aprovechamiento de los restos de corta de choperas para biomasa

tulo 10, sobre trituración de biomasa procedente de trabajos selvícolas), el porcentaje de tiempo de trabajo productivo sobre tiempo total se encuentra en la horquilla entre el 55 y el 65%. Esto afecta de manera directa sobre el rendimiento, y **para superar este problema hay que centrarse en los aspectos organizativos**, es decir, planificar el trabajo para que los tiempos muertos de las máquinas protagonistas del sistema, la astilladora y la trituradora, sean los mínimos posibles.

6.13.6. En cuanto al acopio de restos

- **El rendimiento de la Manitou acopiando biomasa era de entre 0,3 y 0,4 ha/hora, pero en la práctica este rendimiento se veía muy disminuido porque realizaba otras tareas** al mismo tiempo, tales como retirar la biomasa triturada de la zona de desahogo de la cinta transportadora, desplazar la trituradora, y sobre todo, acercar la ramera donde la retroexcavadora pudiera cogerla, ya que esta trabajaba en fijo y sólo podía coger lo que estuviera al alcance del brazo de su grúa. Este sistema de trabajo, en ocasiones hace que se produzcan tiempos muertos en el trabajo de la trituradora.
- **Para mejorar la logística del sistema, se debería introducir un operario más, con otra pala cargadora en el sistema, para que realice todas esas labores mientras que otro se dedica únicamente a acopiar los restos, o bien planificar la organización de modo que la Manitou preceda en unos cuantos días en el trabajo a la trituradora.**

6.13.7. En cuanto a los costes de aprovechamiento

- **El coste unitario de elaboración de biomasa para los sistemas de trabajo propuestos es de 45,89 €/t para la astilladora y de 18,98 €/t para la trituradora.**
- Estos valores reflejan el **coste directo de la tonelada de astilla verde puesta en cargadero, sin incluir** el coste de transporte a una planta de consumo, los **costes indirectos y de estructura** y el **beneficio industrial** (estimados en otros casos en 15% y 12%, respectivamente), además de los **costes fijos** de explotación que supone el traslado de las máquinas al lugar del aprovechamiento o el **pago por la biomasa “en pie” a la propiedad.**
- **El coste de la tonelada de astilla elaborada por la astilladora (45,89 €/t) resulta absolutamente inasumible**, teniendo en cuenta que en una central de consumo se puede pagar, en la fecha de realización de las experiencias, entre 45 y 50 € la tonelada verde.
- **En el caso del material triturado, este sí puede encontrarse dentro de la rentabilidad.** Dependerá del tamaño de la chopera (a mayor tamaño de chopera, menor coste fijo de explotación a imputar sobre la tonelada de astilla) y de la distancia de transporte al centro de consumo.
- **Los costes de elaboración de material triturado podrían reducirse, si se utiliza una máquina más adecuada y se realizan mejoras en el sistema de trabajo**, aumentando el rendimiento de la máquina, tal y como se propone en apartados anteriores.

6.13.8. En cuanto a la calidad de la astilla

- En el caso de **la astilladora Jenz**, con un tambor con 8 cuchillas y trabajando a un régimen elevado de revoluciones, producía una **astilla homogénea con un tamaño demasiado pequeño para ciertas aplicaciones, menor de 30 mm.**
- **La trituradora producía un material más heterogéneo con un tamaño de astilla entre 90 y 150 mm**, al producirse la rotura por golpeteo y no por corte como en la astilladora, el producto resultante es muy fibroso y **con claro predominio de una dimensión sobre las otras (partículas muy alargadas).**
- En ambos casos, **el material resultante contenía una alta proporción de finos (partículas menores a 3 mm), lo cual puede ser un inconveniente para muchos tipos de calderas.**
- En general, **el material astillado es de mejor calidad que el triturado**, ya que el tamaño de astilla es menor, y esta es más heterogénea. Pero, **en este caso, el tamaño de astilla es demasiado pequeño** para ser transportado por la parrilla de alimentación hasta los quemadores, según los encargados de recibir la biomasa en la central de destino.

EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE BIOMASA EN CLARAS SOBRE REPOBLACIONES DE *Pinus Sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait.

El presente capítulo del Manual Técnico está basado en cuatro experiencias reales de aprovechamientos de biomasa realizados en montes de Castilla y León, en los Términos Municipales de La Roliza, El Royo y Cabrejas del Pinar (Soria). En el manual se hará referencia a los métodos de trabajo, las características de los montes estudiados y los valores de rendimientos y costes observados, aunque también se comparará con referencias de otras fuentes. Las experiencias fueron coordinadas y financiadas por la Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (CESEFOR), bajo el control del equipo de la Universidad Politécnica de Madrid.

7.1. Fases de los trabajos, equipos y secuencia de las operaciones

Se trata de un sistema de aprovechamiento de árboles completos, en que se extraen árboles de pequeño tamaño procedentes de clareos y claras (las llamadas “entresacas”) sobre



Fig. 145: Esquema de organización del aprovechamiento de biomasa por sistema de árboles completos (Fuente: adaptado de Alakangas – VTT- en Sikanen y Tahvanainen, 2006).

masas de pino silvestre o resinero. Los métodos de producción en los países escandinavos, donde este tipo de intervenciones tiene más tradición y está creciendo en los últimos años, se muestran en la *Figura 145*, análoga a la mostrada en el apartado de rebollares.

En Castilla y León se añaden algunas posibilidades en este sistema de árboles completos para biomasa, como el uso de motosierras o “procesadoras” convencionales (no multita-

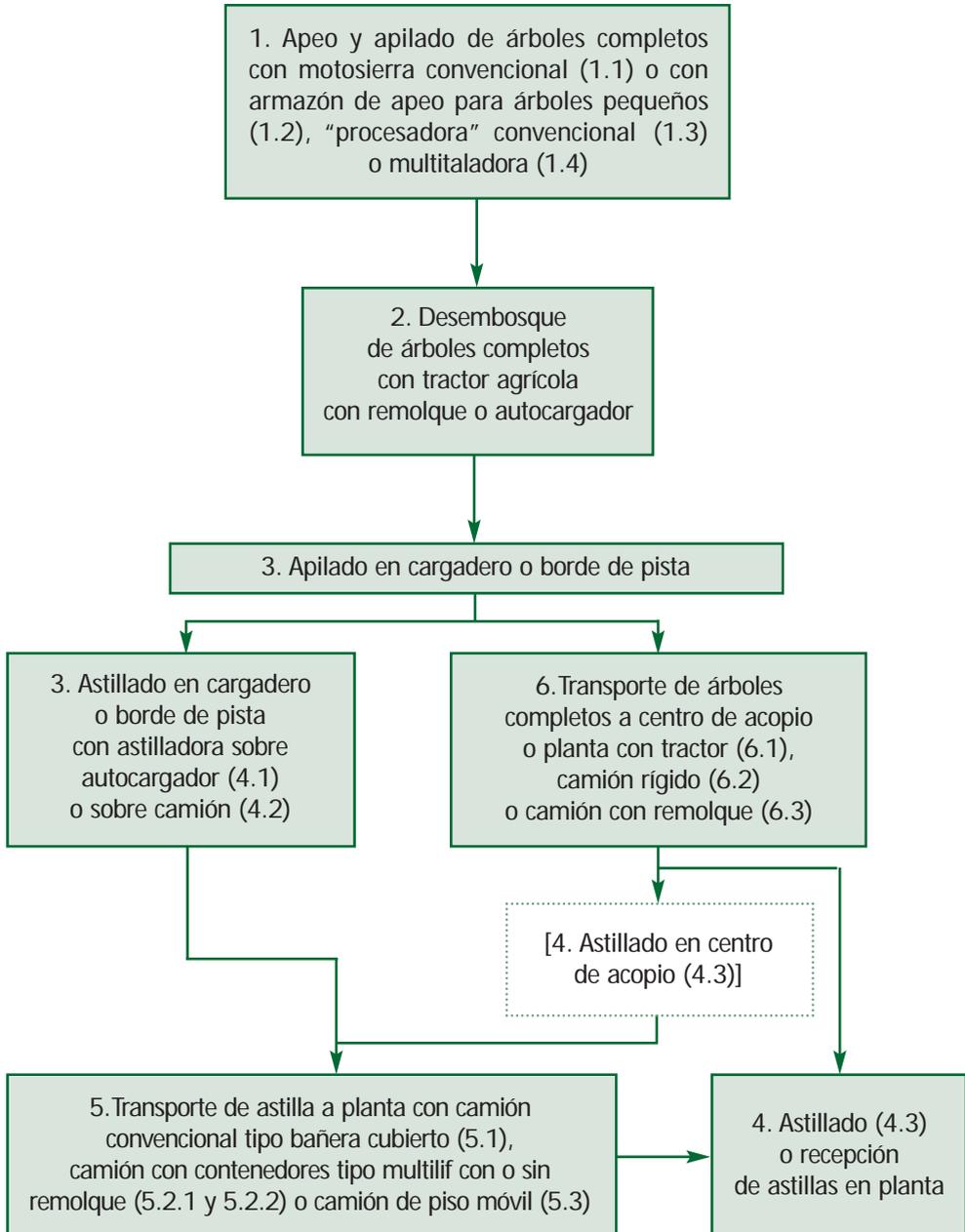


Fig. 146: Esquema de posibilidades de aplicación del sistema de aprovechamiento de árboles completos en repoblaciones de coníferas de Castilla y León.

El aprovechamiento integral de biomasa en claras sobre repoblaciones

ladoras), de acuerdo con la Figura 146 –de hecho, en los países nórdicos se usa una mayoría de cabezales con capacidad de procesamiento para este fin, probablemente por su mayor polivalencia–.

Se presentan a continuación algunas imágenes –Figuras 147 a 152– relativas a la aplicación de este sistema en varios aprovechamientos de pino en Castilla y León. Se han empleado procesadoras convencionales para el apeo y reunión. La extracción de árboles com-



Fig. 147: Procesadora Valmet.



Fig. 148: Autocargador Valmet transportando árboles completos.



Fig. 149: Astilladora de cuchillas de tambor Woodsman.



Fig. 150: Trituradora de martillos Willibald.



Fig. 151: Cargadora ligera de brazo telescópico cargando astillas en camión de piso móvil.



Fig. 152: Empacadora Fiberpack sobre autocargador.



Fig. 153: Autocargador Ponse transportando pacas.



Fig. 154: Camión con remolque y grúa cargado con pacas.

pletos se produjo mediante autocargador y el astillado o procesado se produjo en el cargadero. El transporte de la astilla se hizo con camión de piso móvil con capacidad para 90 m³ de astilla.

En realidad, una de las experiencias (Figuras 153 y 154) no siguió el sistema de aprovechamiento de árboles completos, sino que consistió en el aprovechamiento separado de biomasa y madera. En este caso la biomasa, que había sido amontonada *ex profeso* durante las operaciones de apilado mecanizado de la madera, fue empacada después de extraer la madera con una empacadora Timberjack Fiberpac montada sobre un autocargador Timberjack (el equivalente actual sería una John Deere 1490D Slash Bundler).

7.2. Evaluación del recurso: importancia y localización en Castilla y León. Tabla de diámetros – Pesos de biomasa

Las masas repobladas de pinos en Castilla y León suponen alrededor de 410.000 ha, de las que 82.000 son de Pino pinaster, 194.000 ha de pino silvestre y 80.000 de pino laricio, según el Mapa Forestal de España 1:50.000 (2003). De acuerdo con el Tercer Inventario Forestal Nacional (2005), la superficie total cubierta por estas especies de coníferas es:

- Pino silvestre: 194.000 ha.
- Pino negral: 82.000 ha.
- Pino laricio: 26.000 ha.
- Pino carrasco: 16.000 ha.

Las experiencias se han llevado a cabo en dos montes de repoblación de *Pinus sylvestris* L., y en uno de *Pinus pinaster* Ait. Uno de los montes de silvestre, situado en el Término Municipal de El Royo (Soria), se dividió en dos estratos por su diferencia en densidad, diámetro medio y altura dominante. Se ejecutaron inventarios forestales para estimar la cantidad de biomasa existente, la extraída y la remanente. Se apearon 42 pies de *Pinus sylvestris* L. y 12 de *Pinus pinaster* Ait. y se pesaron y midieron para ajustar una ecuación peso verde por árbol - diámetro. Los resultados de los inventarios se muestran en las siguientes Figuras 155 a 160.



Fig.155: Distribución inicial diamétrica de las masas de Pinus sylvestris en Cabrejas del Pinar.

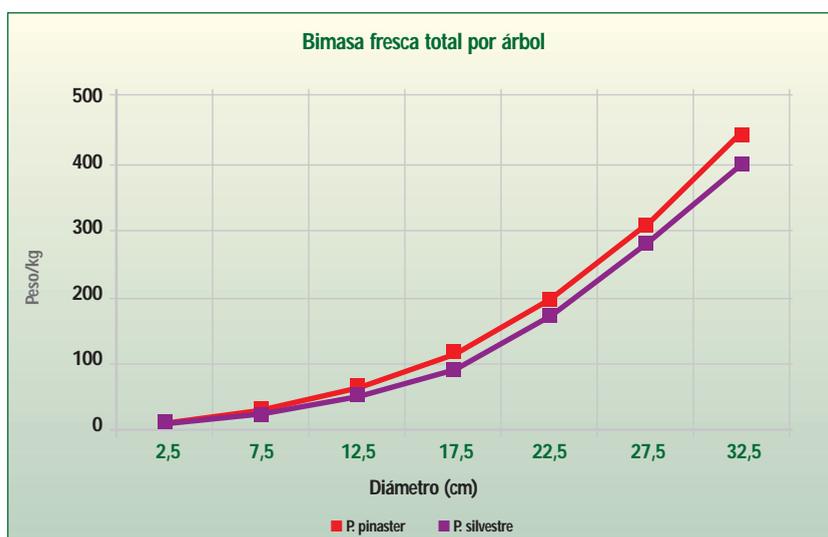


Fig. 156: Peso de biomasa fresca – diámetro para las especies de P pinaster y P sylvestris.

El diámetro medio de la masa y la altura dominante, junto con la densidad, determinan la cantidad de biomasa aérea de un monte El estrato 2 del monte situado en el Término Municipal de El Royo (Soria), que en adelante se denominará “El Royo 2”, es la masa con mayor densidad de pies y diámetro medio de entre las estudiadas, y es con diferencia la que tiene mayor cantidad de biomasa por ha, incluyendo el fuste.

El peso de las claras en los montes de silvestre ha sido elevado, en torno al 40%. En primeras claras retrasadas sobre repoblaciones de pino silvestre, se aconseja un peso en torno al 30% del área basimétrica (J. M. González, 2007). Este peso puede justificarse en parte por la inexistencia de claros previos y por la abundancia de árboles gemelos en el caso de El



Fig. 157: Distribución inicial diamétrica de las masas de Pinus sylvestris en El Royo.

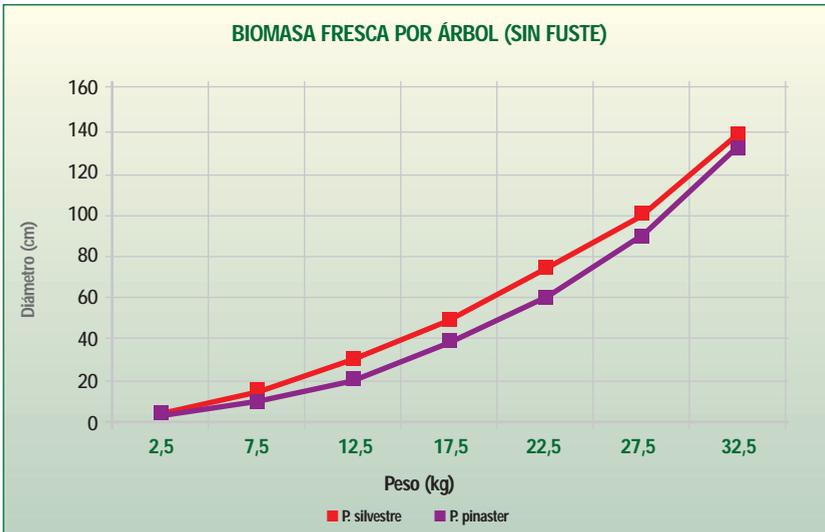


Fig. 158: Peso de biomasa fresca (sin fuste) – diámetro para las especies de P. pinaster y P. sylvestris.

Royo. Además, el peso de corta reflejada es la suma de lo extraído en las calles y entrecalles, es decir, de la fracción sistemática y la selectiva, cuando las referencias se refieren con frecuencia sólo a una clara selectiva.

La proporción en peso verde de la copa frente al total del árbol decrece conforme aumenta el diámetro, aunque en valores absolutos aumente. Esta información es relevante en caso de aprovechamiento combinado de madera y biomasa.

Según experiencias nórdicas, la rentabilidad de un aprovechamiento de biomasa está por encima de las 40 ó 50 t/ha, es decir, que todos los aprovechamientos estudiados, salvo el del monte La Roliza, partieron de este umbral.



Fig.159: Distribución diamétrica inicial de la masa de Pinus pinaster en La Roliza.

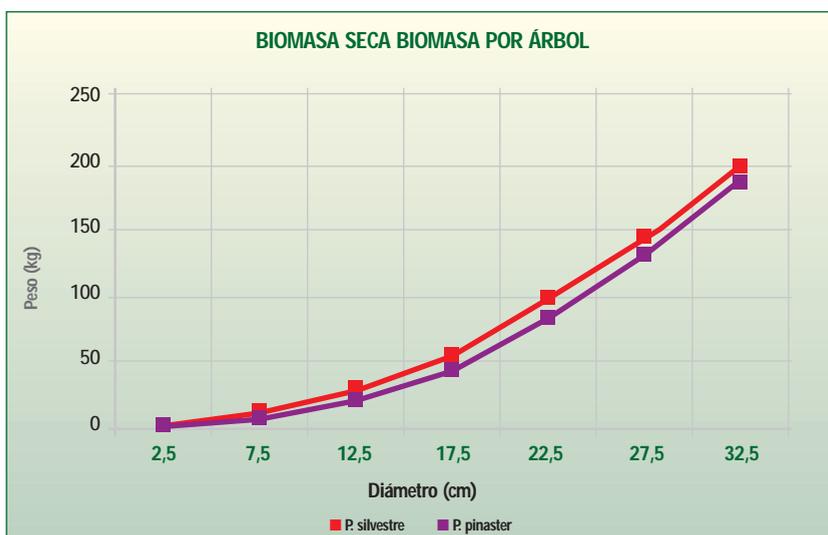


Fig. 160: Peso de biomasa seca – diámetro para las especies de P pinaster y P sylvestris.

7.3. Breve descripción de las experiencias estudiadas

En las experiencias llevadas a cabo en Castilla y León recientemente mediante el sistema de aprovechamiento de árboles completos se ha utilizado el esquema de operaciones que se describió en la *Figura 146*, empleando las máquinas indicadas en la *Tabla XXXI*.

Como se ha indicado, otro de los ensayos obedeció a un esquema diferente, no como aprovechamiento integral, sino que sólo se aprovecharon los restos de una clara de pino resinero, que se recogieron y empaquetaron con una empacadora Fiberpac montada sobre el chasis de un autocargador Timberjack 1210B, para su posterior saca con tractor autocargador y

el transporte final de las pacas con objeto de proceder a su astillado en parque de fábrica. Este aprovechamiento fue mixto, de madera y biomasa.

Estrato	Apeo y reunión	Saca	Procesado biomasa	Transporte
Término Municipal de El Royo (El Royo 1 y 2) <i>Pinus sylvestris</i> L.	Cosechadora Valmet 911.1 con cabezal convencional	Autocargador Valmet 910	Astilladora remolcada sin grúa Woodsman sin grúa	Camión piso móvil 90 m ³
Término municipal de Cabrejas (Pinar Grande) <i>Pinus sylvestris</i> L.	Idem	Idem	Trituradora remolcada de martillos Willibald sin grúa	Idem
Término municipal de la Roliza. <i>Pinus pinaster</i> Ait.	Cosechadora Ponsse con cabezal convencional	Autocargador Ponsse	Empacadora <i>Timberjack Fiberpack</i> 1210B y astillado de pacas en central de acopio con astilladora Erjo con grúa	Camión con remolque

Tabla XXXI: Esquema de trabajo.

Monte	Cabrejas	El Royo 1	El Royo 2	La Roliza
Densidad inicial (pies/ha)1856	2537	1725	1124	
Densidad final (pies/ha) 832	869	767	448	
Diámetro medio inicial (cm)16,0	9,9	18,9	20,1	
biomasa inicial (t/ha, peso verde)	208,0	151,2	327,6	173,5
biomasa extraída(t/ha, peso verde)	94,8	74,0	161,8	32,2*
Proporción media de peso de copa/peso total de árbol	0.40	0,46	0.37	0.35

Tabla XXXII: Parámetros dasométricos de los inventarios.

* En La Roliza, no se extrajeron árboles completos, sino exclusivamente la biomasa de la copa (ramas y raberón)

7.4. Consideraciones previas al aprovechamiento de biomasa

7.4.1. Selección del lugar del aprovechamiento

Al igual que en el caso de los rebollares, seleccionar o desechar un lugar de trabajo dependerá de las siguientes características:

- **El tamaño y la homogeneidad del aprovechamiento.** Estos son factores de primer orden. Cuanto más grande y más homogéneo sea un lugar de aprovechamiento, mayor será la productividad. Los lugares con numerosas especies o clases diamétricas suponen un descenso importante de la productividad (Alakangas, 1999). Los montes pequeños no resultan rentables, especialmente si el sistema es mecanizado y requiere el transporte de más de una máquina. Los portugueses, aunque frecuentemente trabajan en montes más pequeños por motivos sociales o de oportunidad, estiman como ya se ha señalado, en 500 toneladas verdes de astillas el mínimo tamaño para un esquema de saca de restos y astillado fijo (Lagoa, 2005).
- **La carga de biomasa a extraer por hectárea.** Según también se ha indicado, de acuerdo con Sydved, en Suecia en 2005 se consideraba rentable actuar por encima de 40

a 50 toneladas verdes de restos por hectárea, para la rentabilidad en extracción de restos de cortas a hecho. Desde entonces, la demanda ha aumentado, lo que ha hecho subir lo precios y, por tanto, entran en rentabilidad ciertos aprovechamientos con producciones inferiores. La extracción de árboles completos de claros, que al contrario que la recogida de restos de cortas a hecho, está subvencionada, solía llevarse a cabo con producciones de 30 a 50 MWh por hectárea (poco más de 15 t verdes de astilla). En pinares con características similares a los del estudio la biomasa a extraer por hectárea está en torno a las 100 t/ha (1t verde \approx 1.7 MWh, para la astilla extraída de los pinares). Si se aceptan las referencias sobre límites de rentabilidad operativa obtenidos en Portugal (500 t), la superficie mínima para rentabilizar un aprovechamiento de este tipo sería de 5 ha.

- **Pendiente.** Una pendiente media por encima del 30 % impediría o dificultaría seriamente la mecanización. Pendiente mayores pueden provocar el vuelco lateral de la cosechadora y, especialmente, del autocargador. En cualquier caso, en terrenos pendientes se recomienda que sea el maquinista quien trace las calles, bajo el control, en su caso, de los técnicos o agentes de la Administración.
- **Matorral.** El matorral dificulta el trabajo al impedir la visión de la base del tronco. Esto aumenta la posibilidad de colisión del espadín con piedras, cortes poco eficientes que afectan a árboles que deberían quedar en pie, y provoca que los tocones queden más altos. El matorral está en continuo contacto con los latiguillos de la maquinaria provocando rozamiento, enganches y tirones que pueden deteriorarlos.
- **Piedras.** Las piedras suponen un riesgo de colisión para el cabezal, pudiendo dañar los elementos de corte. Además pueden desestabilizar la máquina y producir el vuelco.
- **Distancias de desembosque.** Se requiere que las distancias de desembosque no sean excesivas y que haya un lugar con espacio suficiente para cargadero, y que se pueda garantizar que esté en buen estado durante la época de trabajo – es importante evitar el encharcamiento, o tomar medidas paliativas si fuera inevitable, pero teniendo en cuenta la organización y los costes *a priori* -.
- **Distancia de transporte a la central de suministro.** La distancia de transporte a la central de suministro condicionará la rentabilidad del aprovechamiento, debiéndose seleccionar adecuadamente tanto el método de tratamiento de la biomasa bruta como su forma de transporte. Es tan importante este apartado que se tratará en detalle más adelante.

7.4.2. Planificación previa

Una de las primeras decisiones que se deben tomar antes de decidir un aprovechamiento de la biomasa forestal en cualquiera de sus variantes es el esquema general del aprovechamiento en cuanto a la **elaboración que se va a dar a la biomasa** antes de entregarla al demandante (que en principio, será un pequeño o gran consumidor final –para producir calor y/o electricidad– o un “almacenista” con capacidad de procesar la biomasa en un “terminal logístico” o centro de almacenamiento y procesado).

La decisión dependerá de las capacidades y especificaciones que este demandante imponga. Como se ha reiterado, los demandantes son tanto más exigentes cuanto menor es su tamaño, a saber:

- En aplicaciones térmicas a escala doméstica o de pequeñas colectividades se exige astilla limpia, de granulometría pequeña y lo más seca posible.
- En el extremo contrario estarían los grandes consumidores o terminales logísticos con capacidad para el procesado posterior de la biomasa, que admitirá cualquier categoría de biomasa, aunque la pagará a diferente precio en función de la humedad, tamaño y homogeneidad de las partículas, contenido en impurezas, etc.

En este último caso, la decisión sobre **si procesar o no la biomasa en monte** o cargadero es una cuestión de distancia de transporte, con el principio de que, dado que la preparación de la biomasa –astillado, limpieza, etc.– es siempre más eficaz y barata en destino, la mayor ventaja de su procesado en origen es la reducción de los costes de transporte. Así pues, tiene interés estudiar la dependencia entre las distancias de transporte y los costes conjuntos de preparación y transporte, que se describe con más detalle en el apartado 7.6 (Elección de medio de transporte)

Una primera consideración se refiere a que las distancias de transporte podrán ser cortas, pensando en consumidores de tamaño medio o grande, sólo si la densidad del recurso es elevada, es decir, en zonas forestales con abundante posibilidad productiva en biomasa y sin otras importantes limitaciones para este aprovechamiento.

La segunda importante decisión es, en caso de optarse por el procesado en monte de la biomasa, la elección de la **forma de ese procesado**, esto es, de si se va a pretriturar –con máquina de tornillo o tornillos lentos–, triturar –con máquinas rotativas de martillos o dientes– o astillar –con cuchillas, generalmente montadas sobre un tambor rotatorio–, la biomasa. Hay que observar que el valor añadido del material es máximo en el astillado –menor granulometría y mayor homogeneidad– y mínimo en el pretriturado –grandes tamaños de partícula, menos homogeneidad–, por lo que sólo se elegirá esta opción cuando no se tenga más remedio, esto es, para el caso de abundancia de piedras, elementos metálicos u otras impurezas en el material a triturar.

Otra importante opción es el **sistema de aprovechamiento**. En general, en claros de árboles pequeños, para un tamaño de monte que no sea excesivamente pequeño y si existe un lugar que se puede emplear para el cargadero de árboles y, en su caso, el astillado de los mismos, se opta por el **sistema de árboles completos**. En este caso las impurezas son bajas por tanto se reduce riesgo de colisión con piedras u otro material no vegetal es bajo y el astillado sería la mejor opción de procesado en campo.

Otras opciones menos empleadas serían el sistema de astillas o de astillado móvil, cuyo interés y dificultades de aplicación han sido ya discutidos en el apartado relativo al rebollo.

7.4.3. Preparación y dimensionamiento de los cargaderos

Los cargaderos en el aprovechamiento integral de la biomasa deben ser relativamente grandes, al tener que permitir la descarga y almacenamiento de árboles y el astillado y carga

El aprovechamiento integral de biomasa en claras sobre repoblaciones

de camión, además de tener espacio para el depósito de contenedores o para pilas de astillas, así como para el tránsito de máquinas como el autocargador, la astilladora, los camiones o las palas cargadoras si es necesario

Las características de los cargaderos han sido ya señaladas en el apartado dedicado al aprovechamiento de rebollares.

Como aspectos diferenciales de las experiencias en pinares, se destacará lo siguiente:

En las experiencias en Soria, la astilladora era alimentada por la grúa del camión y las necesidades de espacio aumentaron, puesto que sólo la colocación del camión y la astilladora en posición de trabajo ocupa casi 9 m, como se muestra en la *figura 161*.



Fig. 161: Separación astilladora-camion-pila.



Fig.162: Cargador telescópico ligero cargando un camión de piso móvil.

- El cargadero, para un monte grande como El Royo, debe ser lo más amplio posible para facilitar el apilado de los árboles completos. Debido a que la astilladora y la trituradora alcanzan rendimientos de trabajo que pueden ser el triple de la cosechadora y autocargador forestal, es fundamental para optimizar el ritmo de trabajo que el cargadero albergue cantidad de biomasa suficiente para que la astilladora o trituradora no alcance a las otras máquinas.

Según el apilado aconsejado, la relación entre toneladas de astillas (en verde), volumen de pila y superficie ocupada es la que se muestra en la *Tabla XXXIII*.

En dicha Tabla, y en las experiencias de las que deriva, la altura de apilado se considera de 2,2 m y la anchura máxima de la pila es igual a la altura dominante de los árboles extraídos, en este caso de 14 m.

Para un aprovechamiento en el que se extrajeran 500 toneladas, se necesitaría la superficie de monte que se muestra en la *Tabla XXXIV* –siempre que lo admitiera la selvicultura planificada–, con las extracciones por unidad de superficie que se indican.

Toneladas verdes astilla /m ² pila	m ² pila/tonelada verde de astilla	Densidad aparente pila (kg/m ³)	Densidad aparente astilla (kg/m ³)
0,24	4	100	285

Tabla XXXIII: Dimensiones unitarias del cargadero.

Extracción	Superficie
30 t /ha	16,7 ha
50 t /ha	10,0 ha
100 t/ha	5,0 ha

Tabla XXXIV: Superficie de monte.

Para esta cantidad de biomasa, serían necesarios al menos 120 m² de superficie de cargadero para almacenar los árboles completos con una altura de 2,5 m. Además, hay que sumar el espacio para poner la astilladora y camión con grúa, 200 m² y los montones de astillas (en caso de descargar la astilladora en el suelo), 1.315 m².

Si se compara el rendimiento de la astilladora, que crece con el apilado hasta cierta altura (hasta llegar a la que ocupa el operario de la grúa, de acuerdo con González –1987–) y el rendimiento del autocargador descargando sobre la pila, que se reduce con la altura de la misma, la opción de apilado a más altura disminuye tanto el rendimiento del autocargador en la operación de descarga como el rendimiento de la astilladora, a cambio de necesitarse una menor superficie para la pila de árboles. Para tomar una decisión óptima habría que buscar un compromiso entre ambas opciones teniendo en cuenta la disponibilidad de espacio.

7.4.4. Extracción de la biomasa. Elección del medio de transporte

Son de aplicación todas las observaciones y recomendaciones que se aplicaron para el caso del aprovechamiento de árboles completos de rebollo, en cuanto a elección del medio de transporte, etc.

En cuanto a los costes de transporte de la biomasa según se decida transportarla sin elaborar o una vez astillada y el medio de transporte, se van a estimar para este caso, habida cuenta que los parámetros de densidad de la astilla y de la biomasa son diferentes que para el caso de los rebollares. Se consideran las siguientes opciones principales:

- Para la biomasa bruta, considerando la carga directa de la misma en camiones, y
- Para la astilla, su astillado y posterior carga

Se supondrá que todo ello se produce de forma inmediata a la corta, para no complicar los cálculos. En la práctica, cabe también considerar la posibilidad de dejar que los árboles y/o la propia astilla se sequen durante su almacenamiento en el cargadero. Con ello, aunque se reduzca el peso de biomasa y, por ello, se aumenten los costes de su transporte en términos unitarios, también se incrementa notablemente su poder calorífico, con lo que se pueden obtener mayores remuneraciones por el consumidor.

Sin tener en cuenta esta posibilidad, que se estima complicada en muchos casos por el incremento en los riesgos de incendios y/o plagas, se presenta un primer análisis de los costes de la elaboración inmediata y el transporte de biomasa verde, valorando las siguientes posibilidades:

- 1.- **Transportar los árboles completos** directamente al centro de consumo, **empleando el mismo autocargador** que los extrae del monte (capacidad de carga de 33 metros cúbicos aparentes equivalen a unos 5 t de biomasa).

- 2.- **Transportar los árboles completos** utilizando un **camión de caja rígida**, cerrada y equipada con grúa. Este tipo de camión puede acceder sin problema si trabajamos en montes de acceso complicado (capacidad de carga de 50 metros cúbicos aparentes equivalen a 7,5 toneladas en verde)
- 3.- **Transportar los árboles completos en un camión semi-remolque cerrado** (tipo *trailer*) de 70 metros cúbicos aparentes de capacidad. Este tipo de camión podría acceder a montes sin malas condiciones de acceso e incluso, dependiendo de la experiencia del transportista, a montes con condiciones de acceso regulares.
- 4.- **Astillado “fijo” en cargadero y transporte en camión de caja rígida cerrado** –o camión *multilift*–. Sería lo propio de montes con condiciones malas de acceso, aunque el camión *multilift* puede encontrarse con problemas en el manejo de los contenedores en tiempo húmedo, por lo que en principio se supondrá un camión de caja rígida (carga total para 50 metros cúbicos aparentes de 20 t).
- 5.- **Astillado “fijo” en cargadero y transporte en camión de piso móvil** de 88 metros cúbicos aparentes -, en el presente caso se obtiene un peso de carga de 35,2 toneladas, con lo que se superaría la carga máxima autorizada. Aunque se podría emplear si se dejara secar la astilla, se supondrá que, para los presentes cálculos, se utiliza un *trailer* (semirremolque) cerrado de 70 estéreos, que hará un peso de carga de 28 t, lo que en ausencia de grúa permitiría respetar los máximos legales.

Así pues, se compararán los esquemas de costes para montes de acceso complicado – en que las alternativas serían el autocargador y el camión de caja rígida –sea para transportar biomasa bruta o astillas– con montes con condiciones de acceso buenas o intermedias, en que se supone que se podrán emplear *trailers* para los transportes. En las *Figuras 163 y 164*, se aprecia cómo el transporte utilizando el propio autocargador de desembosque sólo es la alternativa más rentable los 5 primeros kilómetros si se lleva a cabo el transporte alternativo con camión de caja rígida, reduciéndose a 4 cuando se usa un camión trailer para el transporte. Esto indica que podría interesar para transportar biomasa a cada Centro Logístico sólo desde montes muy cercanos.

A partir de esta distancia empiezan a hacerse rentable los camiones transportando biomasa bruta (árboles), y a partir de aproximadamente 20 km el sistema *multilift* rebaja los costes de transporte. En el caso de montes de buen acceso, los camiones de piso móvil compiten con el sistema *multilift* para distancias mayores de 20 km.

En el caso de montes en que se deba emplear camiones rígidos –de malas condiciones de acceso– la distancia límite al centro de consumo en que empieza a interesar el astillado es de 22 km. Hay que insistir en que estas alternativas sólo se presentan si el consumidor final puede adquirir biomasa bruta, que corresponde a consumidores de gran tamaño. Estos consumidores pueden incluso preferir adquirir biomasa en bruto, para controlar ellos el proceso y la calidad del astillado.

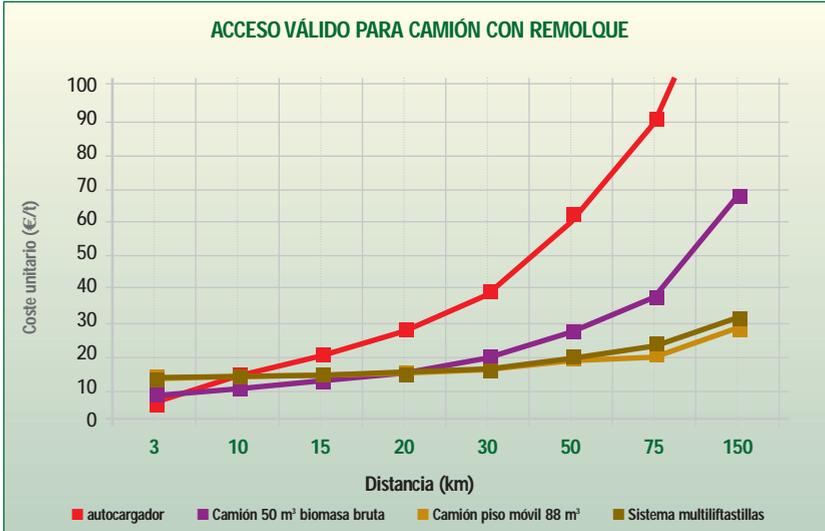


Fig 163: Costes y transporte en montes de acceso apto para camiones con remolque.

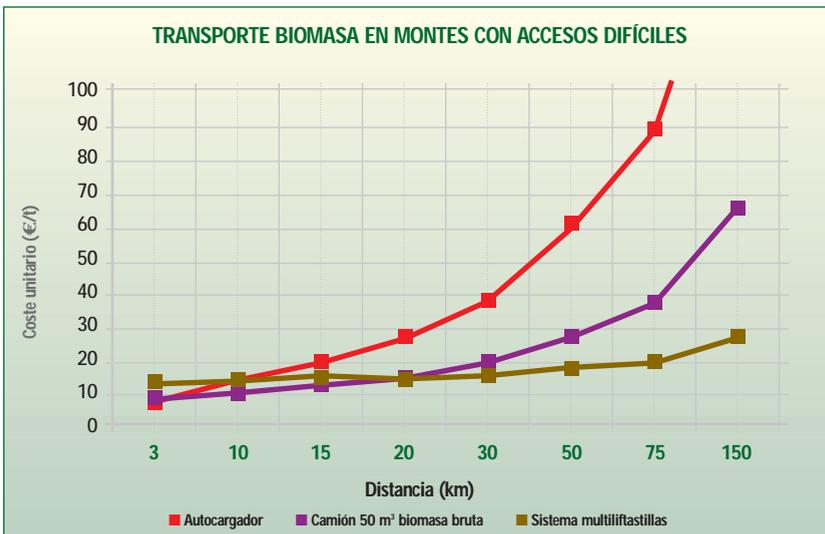


Fig. 164: Costes de astillado y transporte, montes de acceso difícil.

7.5. Recomendaciones de ejecución. Rendimientos, valores observados y referencias

7.5.1. El apeo

- En las experiencias llevadas a cabo en Castilla y León, se han utilizado cosechadoras de gran potencia (228 CV) con cabezal procesador (Figura 165). Estos cabezales están equipados con rodillos y garras para el desramado y tronzado de la madera, lo

que les hace polivalentes, pero por otro lado requieren un motor hidráulico potente (330 l/min) con un mantenimiento más costoso y mayor riesgo de averías.



Fig. 165: Cosechadora Valmet.

Parte de esta potencia queda en desuso en el caso de apeo y apilado de árboles completos de diámetros inferiores a 15 cm.

- La opción de la multitaladora es un cabezal talador apilador que supone el medio de más rápida expansión en Escandinavia para el apeo de árboles completos con fines energéticos. En España se están importando cabezales multitaladores y ya se ha puesto en práctica uno para el apeo y reunión de rebollos. La desventaja de esta tecnología es que, en caso de existir pies de dimensiones maderables, no se puede tronzar y clasificar madera como vienen haciendo las empresas de aprovechamientos. Incluso si el destino va a ser biomasa independientemente de las dimensiones de los pies, los de mayor altura pueden requerir ser cortados en dos partes para su desembosque en autocargador, operación que se dificulta o impide con una multitaladora.
- La multitaladora debe ajustarse en tamaño y dimensiones al trabajo. En general, las cosechadoras para esta función no tienen una gran demanda de potencia, (<100kW ó 140 CV), dado el poco peso que deben manejar y la reducida potencia hidráulica que requieren, al no necesitar sistema de alimentación para desramar. El cabezal de guillotina con garras acumuladoras pesa en torno a 0,5 t frente a 1,2 t del cabezal procesador. Es normal en los países nórdicos usar máquinas pequeñas de segunda mano para esa función.
- Otra opción en cuanto al cabezal es incorporar a un cabezal cosechador unas garras acumuladoras. Estas garras pueden llevar un aumento del rendimiento del tiempo empleado por árbol según se muestra en la *Tabla XXXV*, referida a pies de un diámetro normal medio de 8 cm:

Nº pies por ciclo	Segundos/árbol
4	15,7
3	17,0
2	20,4
1	27,8

Tabla XXXV: Tiempos por árbol para apeos múltiples.

Para la experiencia del cabezal procesador con garras acumuladoras sobre rebollo, el aumento de rendimiento fue del 20% sobre tiempo productivo y del 13,5 % sobre el tiempo de trabajo.

- Si se realiza un aprovechamiento combinado, separando parte del fuste para madera y copa y rabeón para biomasa, la procesadora debe cuidar de que los restos queden lo más agrupados posibles en el borde de calle para facilitar su posterior procesamiento y evitar que sean pisados por las máquinas y se mezclen con tierra y piedras. Esto supone una pérdida de rendimiento sobre tiempo de trabajo del 10 % según los valores empleados por árbol cronometrados en claras (Tolosana *et al*, 2002).
- El tiempo de cosechadora empleado por árbol en árboles completos de *Pinus sylvestris* L. sin tronzar es de 26,7 s y en el caso de tronzar, de 60,5 s. Para el tronzado en longitudes de “madera corta” con acordonado de restos en la experiencia de clara de pinaster en el Monte “La Roliza”, el tiempo por árbol fue de 87,5 s. En todos los casos se trata de tiempo productivo.
- El rendimiento de una cosechadora con cabezal convencional en una clara de pino silvestre apeando y reuniendo en los bordes de una calle árboles completos (sin tronzar) para un diámetro medio de extracción de 10 cm es de 8,2 t/h de trabajo (peso verde). Si el diámetro medio fuera mayor también aumentaría la altura de los pies siendo necesario un corte más sobre cada pie para dividirlo en dos partes y facilitar la carga posterior. Sin embargo, el aumento de la biomasa por árbol hace que en este caso, para un diámetro de extracción de 16 cm, el rendimiento sobre tiempo de trabajo sería mayor, de 9,4 t/h (Figura 166, a y b).

Los árboles que por dimensiones no se pueden transportar en el autocargador se tronzarán en pie por la mitad, es decir, primero se cortará, apeará y reunirá la mitad superior del fuste y después la base.

- Para aumentar el tiempo productivo de la procesadora en monte es importante contar con repuestos de latiguillos y cadenas de corte. El afilado manual en monte de las cadenas de corte es una operación que baja el rendimiento. Se aconseja el afilado en taller y llevar varios juegos.

7.5.2. Extracción de la biomasa

- El autocargador es preferible al *skidder* para la saca de árboles completos para energía, no sólo por razones selvícolas y ambientales, sino para evitar impurezas que perjudiquen la calidad de la astilla.

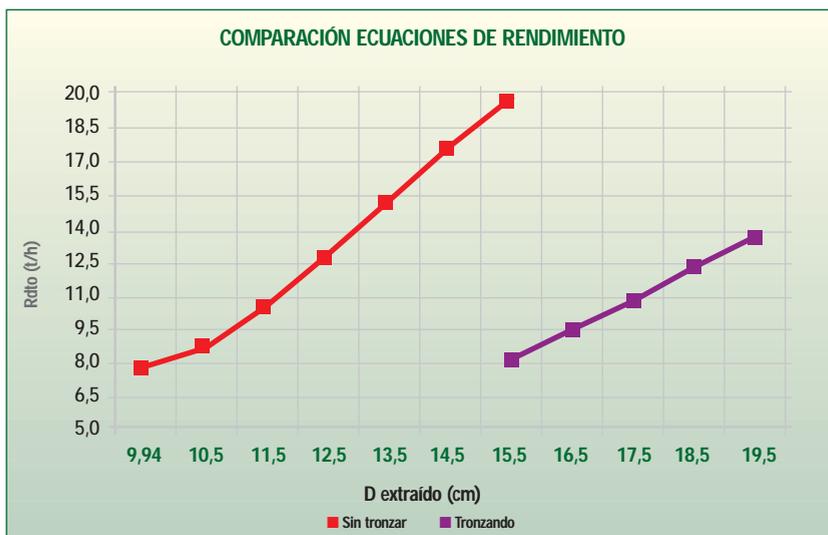


Fig. 166a: Rendimiento según el diámetro normal en el apeo de árboles completos de *P. sylvestris*.

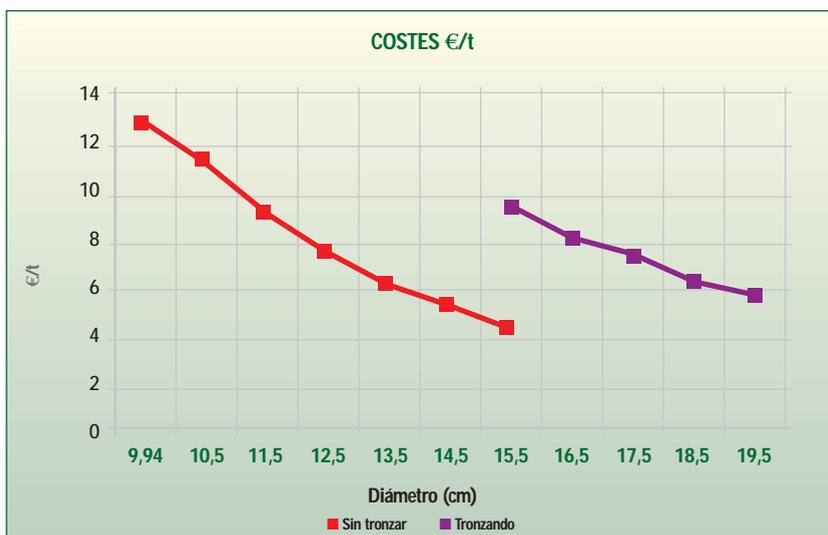


Fig. 166b: Costes de apeo por unidad de peso verde biomasa en *P. sylvestris* en una clara, en función del diámetro normal.

- El autocargador debe tener la máxima capacidad posible, puesto que al recoger los árboles enteros el peso no es el factor limitante, sino el volumen de la caja, siempre y cuando la anchura de la calle que ha abierto la cosechadora sea suficiente. El volumen del autocargador Valmet es de 30 m³, pero el volumen de la carga puede ser mayor al sobresalir los árboles por detrás (Figura 167). La estimación para las experiencias llevadas a cabo es que como media se puede sacar 45 m³ aparentes, lo que supuso 5 t de biomasa sólida.



Fig. 167: Carga real de árboles enteros.

- Hay sistemas para ensanchar la carga, mediante teleros extensibles hidráulicamente o suplementos que alargan la “cama” del remolque (largueros adicionales en la trasera o en los laterales). Este tipo de soluciones técnicas pueden dificultar el funcionamiento en cortas parciales en que las calles deben no ser excesivamente anchas. También hay sistemas compresores, normalmente en autocargadores con paneles laterales macizos accionados por dos o tres potentes cilindros hidráulicos por cada lado (Figuras 168 y 169). Estos sistemas se recomiendan más para residuos sueltos que para árboles completos –aunque se pueden utilizar en éstos, sobre todo en la modalidad de garras compresoras hidráulicas, duplicando la capacidad de transporte de los tractores agrícolas con remolque–. Normalmente se emplean por empresas que utilizan el autocargador más de 6 meses seguidos al año para saca de restos, pues deben desmontarse para su uso en desembosque de madera.



Fig. 168 y 169: Vista lateras de cargador adaptado a la saca de biomasa con laterales abatibles.

- El brazo de la grúa debe ser lo más largo posible, y con una pinza que tenga mayor capacidad que las que utilizan habitualmente para manejar la madera. No obstante,

El aprovechamiento integral de biomasa en claras sobre repoblaciones

para árboles completos no son recomendables las pinzas tipo “pulpo” o las pinzas anchas a las que se quitan los travesaños y se refuerzan las puntas, tan útiles para trabajar con restos, porque sí que interesa propiciar que la carga esté alineada para su disposición longitudinal en el remolque.

- Los pies de elevada altura se deben tronzar en dos piezas por la cosechadora para facilitar su manejo. En caso contrario (o si el cabezal no está diseñado para hacer esta función) se puede dotar a la grapa de la grúa del autocargador de una espada para esta función.
- La cosechadora siempre apiló perpendicularmente al eje longitudinal de la calle, sin embargo para la saca un apilado más ventajoso es el apilado longitudinal. Salvo que las calles estén muy distanciadas (caso en el que se perderá demasiado tiempo de la cosechadora, más valioso que el del autocargador), puede ser más interesante el apilado longitudinal, con la única salvedad de que la calle debe tener la entrada de tal modo que se pueda cargar con el autocargador en el sentido inverso en que haya cortado la cosechadora –para que cargue con la coz por delante–).
- En todo caso, los pies se deben cargar en el remolque paralelamente a su eje longitudinal y, como se ha indicado, con la coz hacia la delantera del autocargador.
- Recuperar todo el material apilado, incluyendo fragmentos desprendidos y árboles muy pequeños, reduce los rendimientos de la saca. Es más productivo dejar los restos más difíciles de cargar en el terreno y así disminuir también las impurezas en el material. No obstante, en el sistema de árboles completos, se recoge un elevado porcentaje de la biomasa producida: en la experiencia estudiada en Soria, el autocargador recogió entre el 90 y el 95 % de los restos. En el caso de tener que procesar los árboles, el volumen de restos que se quedan en el suelo es mayor. En el monte de pino resinero, la empacadora Fiberpac dejó 8,4 t/ha (en verde), es decir, un 25% de la biomasa producida.
- Es muy importante maniobrar cuidadosamente con los árboles al cargar de la pila al remolque, para evitar daños sobre la masa remanente, que pueden ser de especial gravedad durante el periodo vegetativo.
- En la carga, especialmente si se aprecia o se sospecha la presencia de piedras, es importante sacudir el fajo de pies con la pinza para propiciar que las piedras se desprendan. Para garantizar el cuidado en estas operaciones, lo ideal es que la empresa que se encargue del desembosque de los árboles completos sea la misma que efectúe el astillado. Si se aprecia o sospecha la existencia de piedras, puede convenir sacudir puntualmente la carga con la grúa también en las operaciones de descarga.
- El apilado de los pies en la pila de cargadero se debe hacer para que la coz del árbol siempre esté situada en el lado en el que se colocará la máquina astilladora. Todos los pies deben estar en la misma disposición. Al contrario que en el caso de los residuos, lo mejor es que el autocargador se coloque paralelamente a la pila para la descarga.
- En la base de la pila debe haber colocados transversalmente al resto unos árboles para facilitar la carga con pinza de la astilladora y evitar así el arrastre de piedras y tierra, elementos que deterioran las cuchillas.

- La pila tendrá una altura igual a la de la cabina de la astilladora para optimizar el apilado. Una altura mayor dificultaría la visión del operario y disminuiría el rendimiento de la máquina más cara del sistema, aunque tiene las ventajas de reducir la proporción de impurezas y dificultar la ganancia en humedad de la biomasa si está seca y llueve persistentemente. De acuerdo con González (1987), la altura óptima de carga es de 2,8 m (astilladoras sobre tractor) a 3,6 m (astilladoras sobre camión).

En las experiencias de Soria, el autocargador, trabajando en llano, osciló su rendimiento entre 3 y 16 t/h de de trabajo (verdes). El rendimiento estaba condicionado por la distancia de desembosque. (Figura 170).

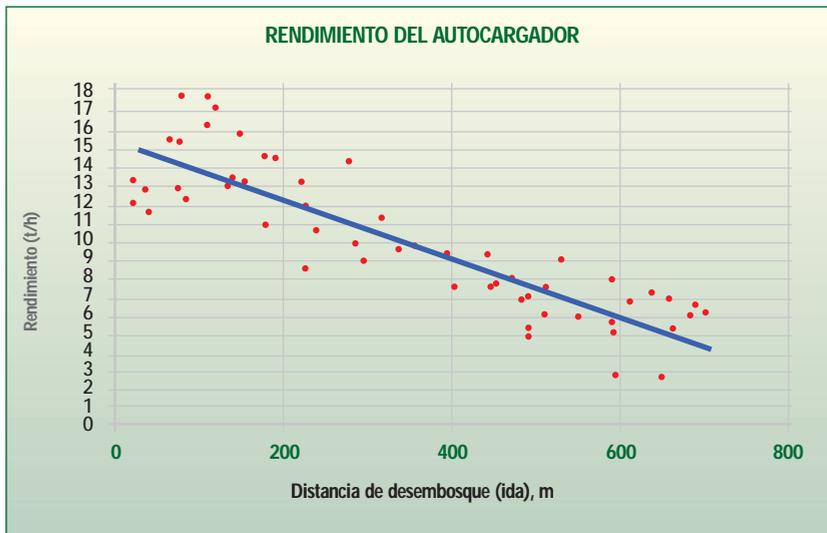


Fig. 170: Efecto de la distancia de desembosque en la saca.

La influencia de los principales factores en el rendimiento se representa en las Figuras 170 y 172. En cuanto a los rendimientos en otras fuentes, se representan en las Figuras 173 y 174 unos gráficos de rendimiento en función de la distancia, recogiendo el efecto de la capacidad de carga del remolque y del peso de la corta, respectivamente. Estas gráficas se han construido a partir de las ecuaciones publicadas por Ranta *et al* (2001). En estas Figuras, se aprecia cómo, para una distancia de desembosque de 250 metros, el rendimiento se incrementa en un 25% al pasar de un remolque de 4 a uno de 7 metros cúbicos sólidos de biomasa de capacidad. De ahí el interés, ya comentado, de los escandinavos en ampliar los remolques de sus autocargadores o dotarlos de paneles compresores para poder cargar más biomasa. Análogamente, para la misma distancia de desembosque, la diferencia de rendimiento entre una extracción de 30 y 75 metros cúbicos sólidos por hectárea, es de casi un 30%.

Los valores obtenidos en las pruebas de Soria son similares a los que predicen estas fuentes para las capacidades de carga más pequeñas, por lo que parece que se pueden utili-



Fig. 171: Efecto de la distancia de desembosque en el coste por tonelada de astilla extraído.

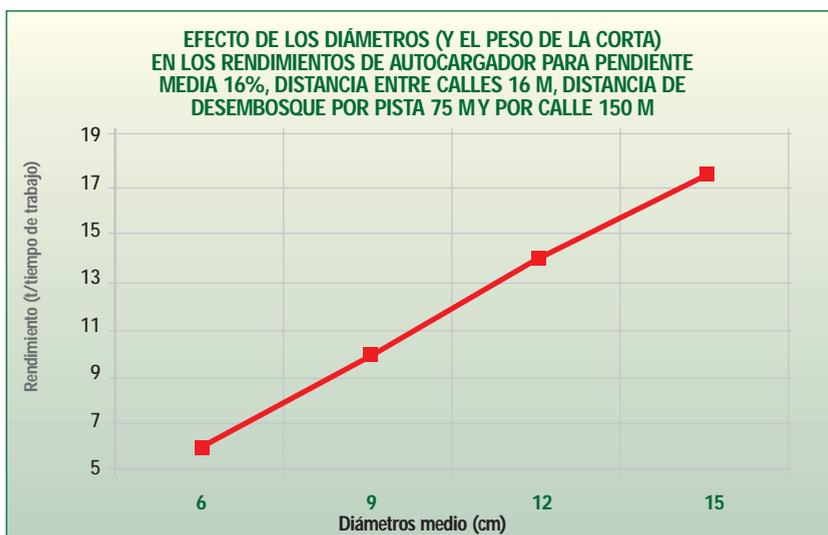


Fig. 172: Efecto de los diámetros en el rendimiento de saca.

zar como referencia y podría deducirse que hay posibilidades de mejora importantes si se incrementase la capacidad de carga, si bien esta tiene un límite al tratarse de claras con calles estrechas.

7.5.3. Astillado en monte. Opciones tecnológicas y rendimientos

- Como ya se indicó para los rebollos, son interesantes para los árboles completos las astilladoras de tambor de cierta potencia.
- Como también se señaló, las trituradoras sólo son justificables ante la certeza de la existencia de abundantes impurezas de piedra o arena abrasiva, suelen usarse tam-

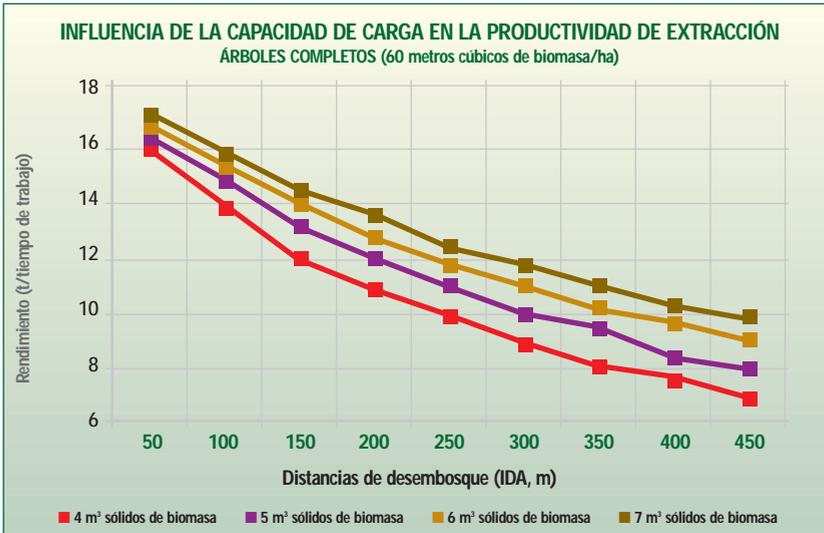
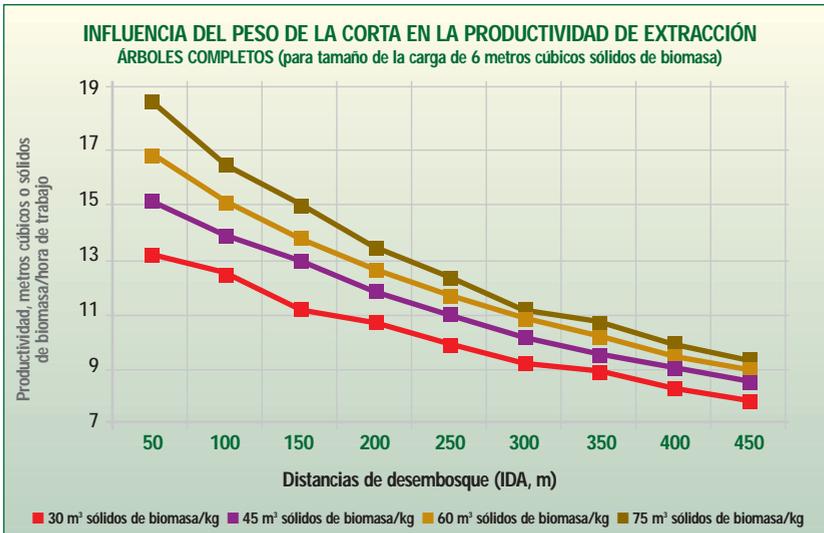


Fig. 173 y 174: Rendimientos de la saca de árboles completos según fuentes nórdicas (Ranta et al, 2001).



bién con maderas muy duras o con abundante sílice, especialmente si están secas (por ejemplo, el eucalipto en Portugal). El hecho es que son máquinas más pesadas y requieren más potencia y tienen más consumo que las astilladoras. En Soria se utilizó una Willibald ESU 4800 de 460 CV y 16,4 t de peso, cuyo sistema de alimentación es una cinta transportadora y que no cuenta con grúa propia, por lo que fue necesario emplear un camión con grúa para su alimentación. Su gran potencia y la buena organización del cargadero, en que se contaba con mucho espacio, permitieron alcanzar rendimientos muy elevados (sobre tiempo de trabajo, 31,6 t/h –en verde–).

- Para una astilladora montada sobre camión es muy importante que el acceso del cargadero sea el adecuado. Una astilladora sobre autocargador o con tren de rodaje de oruga no tendría ese problema, pero su necesidad de transporte independiente origina problemas logísticos, especialmente si se usa en montes pequeños repartidos por un área extensa.
- En caso de astilladora independiente, con ruedas para ser remolcada, también son necesarios buenos accesos puesto que la cabeza tractora y góndola o los camiones de transporte de astilla deben acceder lo más cerca posible al cargadero. Estas astilladoras pueden ser transportadas de una aprovechamiento a otro por cualquier góndola o por un tractor, pero trabajando necesitan una máquina con grúa, que puede ser el autocargador, un tractor o un camión. En la experiencia de El Royo se utilizó una astilladora *Woodsman* de tambor, remolcada, con un motor autónomo para el astillado de 350 CV. La empresa de aprovechamiento utilizó un camión que alimentaba la astilladora con árboles que movía desde la pila hasta la bandeja de alimentación, y el material astillado salía por un cañón directamente al suelo. El rendimiento medio sobre tiempo de trabajo que alcanzó el astillado fue de 16,4 t/h (siempre en verde). Este rendimiento es menor que la trituradora pero el material es más homogéneo, de menores dimensiones, lo que supone mayor calidad.
- Los pies de la parte más baja de la pila son los que se astillan más despacio, porque en cada viaje la grúa carga menos y debe extremar la precaución para no arrastrar piedras. Según el maquinista, la altura de apilado óptima es la que llega la base de su cabina de mandos. Por encima restaría visibilidad y por tanto bajaría el rendimiento.
- El mayor tamaño de la bandeja de alimentación (*Figura 175*) favorece el rendimiento de la astilladora. Se comprobó que el porcentaje de tiempo que dedica la grúa a controlar que el material depositado en la bandeja sea astillado es mayor en el caso de la Pezzolato 900/1000 (38%) con un bandeja de 1,5 m de longitud y usada para árboles completos de rebollo y la Erjo, con igual bandeja, usada en árboles completos de pino carrasco en Navarra (44%), frente al 11% empleado en la astilladora *Woodsman* en estas experiencias.
- En los equipos que se han ensayado en Castilla y León, la astilladora siempre era acompañada por dos operarios. Los empresarios han justificado esta plantilla por la necesidad de dos personas para las labores de mantenimiento de la máquina. En algunos casos, junto al operario de la grúa estuvo un mecánico especializado, y en otros un operario no especializado que ayudaba en la recogida de material vegetal que se salía de la bandeja de alimentación. Este trabajo se desaconseja, por el riesgo de accidente grave del operario trabajando cerca del rodillo de alimentación del tambor astillador. En el caso de depositar el material en el suelo y cargar los camiones con una máquina cargadora ligera de brazo telescópico, este operario podría, además de ayudar al mantenimiento, conducir la citada cargadora telescópica Manitou.

Las cuchillas de una astilladora de tambor se cambian para afilar y así conseguir una fragmentación por corte y no por colisión. Las astillas con cuchillas afiladas son más homogéneas y tienen menos cantidad de finos.

- En las *Figuras 176 y 177* se muestra como cambiar las cuchillas, operación que requiere la presencia de dos personas.



Fig. 175: dimensiones bandeja alimentación.



Fig. 176 Cambio de cuchillas.

La longitud de las cuchillas es entre 80 y 90 cm de largo, sin embargo existen en el mercado cuchillas compuestas por tres piezas, lo que supone mayor facilidad de manejo.

- Las astilladoras requieren diariamente un mantenimiento exhaustivo, a saber:
- Limpieza con aire a presión de virutas del motor y otras partes móviles,
- Engrase y repostado. El tiempo de repostado también es importante. Con un consumo de 44 litros hora y una capacidad de depósito de 250 litros, el tiempo entre repostado y repostado supone algo más de 5,5 horas.
- Cambio de cuchillas: para astillar árboles completos, supuso el 17% del tiempo de trabajo.
- Para prevenir la autocombustión, se debe evitar un excesivo tamaño de los montones (se recomienda hacer montones que no superen los 40 ó 50 metros cúbicos de astilla si se van a dejar durante cierto tiempo en el cargadero).

7.5.4. Empacado en monte

- El empacado plantea el problema de dimensiones de las calles. Para una circulación de la empacadora, en el caso ensayado de la *Timberjack FiberPac* (Figura 178), se debieron abrir calles de 5 m de ancho. Además, para dejar acordonados los residuos fuera de las calles de tránsito de la máquina, se debió invertir más tiempo por árbol en el trabajo de la cosechadora forestal.
- Las pacas tienen la ventaja de poder ser transportadas con los mismos medios que la madera, con el autocargador para el desembosque y los camiones con remolque para el transporte en carretera. Para ello es muy aconsejable empacar con 2,4 m de longitud. En las experiencias llevadas a cabo se obtuvo un volumen medio por paca de 1,2 m³, con diámetros de 80 cm y longitudes de 2,4 m.
- No obstante, en parque de fábrica se deben astillar también. Las cuerdas que se utilizan para compactarlas suponen un problema para una máquina astilladora de tambor convencional –según se comprobó para las pacas obtenidas en esta experiencia, que se astillaron en el parque de biomasa de CESEFOR, en Soria mediante una astilladora móvil ERJO OSW con motor propio de unos 450 CV–, produciéndose atascos en su tambor.

El aprovechamiento integral de biomasa en claras sobre repoblaciones

- Los rendimientos que se obtuvieron con esta máquina fueron anormalmente bajos por la inexperiencia del conductor, pero en algunas fases de trabajo se alcanzaron las 6 t de materia verde/hora, valor inferior pero cercano al conseguido en experiencias similares en Galicia, para pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.), que fue como media de 7,2 t/hora (Sanz y Piñeiro, 2002).



Fig. 177: Filo de cuchillas desgastado tras 6 horas de trabajo.



Fig. 178: Esquema de una empacadora Fiberpac montada sobre autocargador.

7.6. Aspectos de dimensionamiento de equipos y logística del suministro

- Las empresas forestales suelen tener en monte una cosechadora por cada autocargador. El rendimiento del segundo generalmente es mayor, aunque en el sistema de árboles completos con largas distancias de desembosque la cosechadora ofrece mayores rendimientos. Existen varias razones para mantener equipos de dos máquinas:
 - Se puede compartir costoso equipo auxiliar: depósito de combustible, latiguillos del sistema hidráulico, engrasadora, baterías...
 - Ante un atasco es muy útil la presencia de otra máquina de gran potencia para remolcar.
 - Dos operarios son necesarios para la reparación o mantenimiento de las máquinas por el gran peso y/o volumen de las piezas.
- Sería razonable pensar en sistemas de trabajo donde hubiera más cosechadoras que autocargadores, pero las pequeñas dimensiones de los aprovechamientos impiden un dimensionamiento del orden de 3 cosechadoras por 2 autocargadores, que sería el que se obtendría por razones de rendimientos. No obstante, en un monte de gran extensión o para la logística de una empresa de gran tamaño que trabajase en un área no muy grande, sí podría ser interesante dimensionar los equipos con esa proporción.
- Cada tres días de trabajo del equipo cosechadora-autocargador se genera un día de trabajo para la astilladora. Se debe por tanto programar la llegada de la astilladora para que el final de las tres máquinas coincida. De igual forma que se justifica la presencia simultánea de autocargador y cosechadora, se justifica que durante el tiempo de trabajo de la astilladora sea aconsejable la presencia de las otras máquinas.

Para este ejemplo concreto y suponiendo árboles de menos de 15 m de altura, se tendría la proporcionalidad de tiempos de máquina que se refleja en la *Tabla XXXVI*, para obtener 18 camiones de piso móvil de astillas.

Cosechadora	Autocargador	Astilladora	Camiones piso móvil
6-7 días	4-5 días	3-4 días	18

Tabla XXXVI: Equivalencia entre máquinas por días de trabajo necesarios para un volumen de astilla correspondiente a 18 camiones semirremolques de piso móvil.

7.7. Recomendaciones relativas a la calidad de la biomasa

Como se ha señalado, las principales normas orientadas a obtener una biomasa de mayor calidad son las siguientes:

- No arrastrar o incorporar tierra ni piedras con la biomasa. En el caso del manejo de árboles completos, como el descrito en este apartado, la contaminación se puede producir en el apilado, bien porque se incorpore tierra al agarrar los árboles con la pinza del autocargador o al agarrar árboles próximos al suelo de las pilas de cargadero para su astillado. Otra posible fuente sería, en el caso de descargarse astillas en el suelo, la carga de astillas con pala. Las principales medidas en este caso, serían la recogida cuidadosa de árboles por el autocargador, la disposición de árboles perpendiculares a los de la pila de cargadero en la base de la misma, y el procurar la descarga de astilla directa en camión –en caso de no poderse, sería positivo buscar un parque solado o no intentar apurar en la carga de astilla–.
- Dejar secar biomasa y/o astillas para que el combustible llegue lo más seco posible a su destino, por el mayor poder calorífico. Ya se ha comentado la conveniencia de dejar secar los árboles por razones ambientales, pero en muchos casos se procura un secado adicional de los árboles extraídos en el cargadero, siempre que esto no suponga riesgos fitosanitarios o de incendios por encima de lo tolerable. En el caso de las frondosas, dejar secar los árboles aumenta su dureza, lo que conlleva mayor desgaste de cuchillas y mayor potencia necesaria –y consumo de combustible–. También se produce más polvo –mayor proporción de finos–, lo que no resulta positivo para la calidad del propio combustible ni tampoco desde el punto de vista ergonómico y ambiental. Hay que buscar un equilibrio, en función del equipo disponible, entre el mayor precio de la biomasa por su mayor poder calorífico por estéreo, y los problemas logísticos y operativos de trabajar con biomasa seca. Entre otros, para el uso adecuado de una astilladora, reduciendo los costes fijos, conviene recurrir a un programa de optimización del transporte en función de la posición de las pilas, el momento de su apeo y desembosque, la época del año y las características de la demanda.
- En función del destino, el contenido en álcalis y en cenizas en general puede ser perjudicial y dar lugar a rechazos o penalizaciones. En principio, a mayor calidad exigida para la biomasa, más conveniente será que no incluya hojas o, en su caso, acículas, para lo que es también conveniente que se seque en monte.

7.8. Resultados del análisis de astillas

Se muestran los resultados de los análisis realizados en el Laboratorio de Combustibles de la Junta de Castilla y León en León (LARECOM) en la *Tabla XXXVII*.

El poder calorífico sobre peso verde es bastante bajo, 1.487 kcal/kg, pero las calorías sobre seco son muy elevadas. La densidad energética de astillas de pino silvestre en verde sería de 0,6 MWh/m³, que en la clasificación finlandesa suponen la peor categoría. Sin embargo con un secado al aire en el que la astilla alcanzara una humedad del 30 %, entonces la densidad energética sería de 1,05, y sería la mejor calidad. Para el pino pinaster la densidad energética en verde sería de 0,8 MWh/m³, es decir, en el límite de la segunda mejor calidad, así que un secado al aire de pocos días sería suficiente para alcanzar la mejor calidad.

El residuo después de la combustión es muy bajo, un 0,5% sobre peso verde, es decir que por cada tonelada se generan 5 kg de ceniza en el silvestre y 9 en el pinaster, que habría que gestionar. Una central con un consumo de 100.000 toneladas anuales produciría 500 y 900 toneladas para cada especie.

Pino	Pinus sylvestris		Pinus pinaster	
	s/seco	s/bruto	s/seco	s/bruto
Humedad secado al aire (%)		56,2		45,1
Humedad higroscópica (%)		4,0		3,4
Humedad total (%)		60,2		48,5
Volátiles (%)	81,5	32,4	80,2	41,3
Cenizas (%)	1,2	0,5	1,8	0,9
Carbono (%)	51,6	20,5	51,4	26,5
Hidrógeno (%)	4,1	9,1	6,0	8,5
Nitrógeno (%)	0,2	0,1	0,3	0,1
Azufre (%)	0,1	0,1	0,0	0,0
Poder calorífico superior (Kcal/kg)	4.903,0	1.951,3	4.943,0	2.546,0
Pocer calorífico inferior (PCI)v Kcal/kg)	4.570,3	1.487,7	4.627,5	2.117,0
Poder calorífico inferior PCI p (Kcal/kg)	4.551,3	1.458,3	4.609,5	2.090,0

Tabla XXXVII. Características de las astillas obtenidas en las experiencias de Castilla y León sobre claras de pinares (Fuente: Laboratorio de Combustibles de la Junta de Castilla y León en León – LARECOM–).

La humedad total inicial es elevada, solamente para las calderas de lecho fluidizado el material resultante sería válido, porque además admiten tamaños de hasta 5 cm. Para el uso en calderas de parrilla móvil habría que secar las astillas al aire, y para las de parrilla fija además habría que cribar las astillas superiores a 3,8 cm. Para el resto de calderas (quemador ciclónico, lanzadera e inyector) haría falta secar el material de monte y rebajar sus dimensiones.

7.9. Costes de ejecución y de transporte.

Costes horarios estimados, valores medios observados

Teniendo en cuenta los rendimientos explicados, tomando los valores medios de las experiencias y unos costes horarios de las máquinas que se han estimado, empleando métodos estandarizados (Miyata, 1981; Tolosana *et al*, 2004), de acuerdo con la *Tabla XXXVIII*:

Procesadora	Autocargador	Astilladora	Cargador telescópico	Transporte
78 €/h	48 €/hora	120 €/hora	120 €/día	7 €/t a 60 km

Tabla XXXVIII: Coste horario estimado de la maquinaria.

Esta tabla de costes no están incluidos los costes fijos debidos al transporte de las máquinas, que se han fijado en 450 euros por máquina, estimándose que la cargadora ligera se desplazaría junto con la astilladora en la misma góndola.

La estructura de costes (*Figura 179*) apunta a la cosechadora y astilladora como las operaciones más caras y por tanto donde se deberían centrar los esfuerzos de mejora.

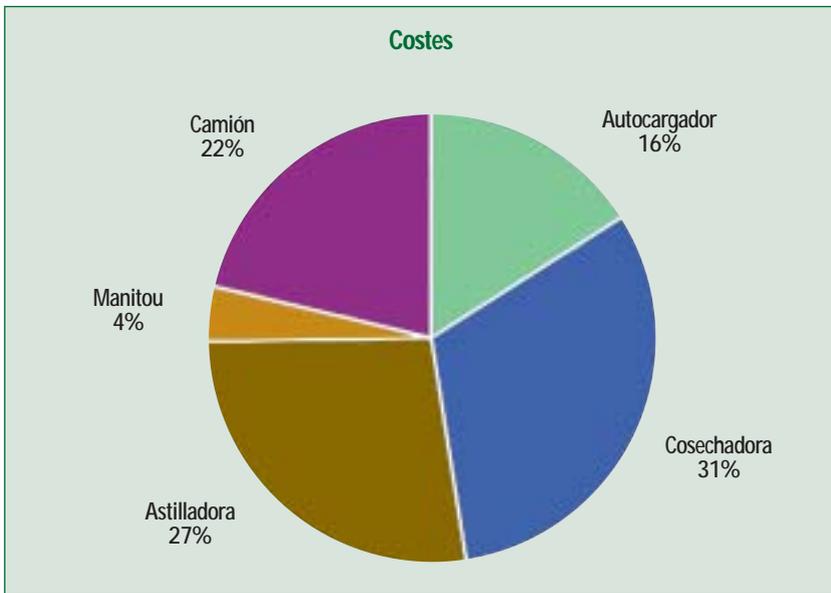


Fig. 179: Desglose del coste de la tonelada de astilla por máquinas.

Para un aprovechamiento aplicando los rendimientos de una cosechadora que no tronza el árbol, con calles a 21 m de distancia, una extracción superior a las 50 t/ha, un astillado sobre suelo con carga de camiones con cargador telescópico ligero *Manitou* en camión de piso móvil de 90 m³, la variación del coste unitario según diámetros y volumen total de astillas es la representada en la *Figura 180*, en que se muestran tres curvas correspondiendo a diferentes tamaños de aprovechamiento, y por ello diferentes costes fijos. Los costes, que se representan frente al diámetro normal medio extraído, incluyen beneficios empresariales



Fig. 180: Evolución del coste según diámetro medio y volumen de biomasa total.

(12%) y gastos indirectos y de estructura (15 %), pero no el pago por la biomasa “en pie” a la propiedad.

La diferencia que se observa en la gráfica orienta sobre la mayor rentabilidad de los aprovechamientos de grandes dimensiones sobre los pequeños, que sería algo mayor aún si se hubiese introducido el aumento de coste horario por máquina derivado de la pérdida de horas de trabajo anuales por continuos desplazamientos.

7.10. Conclusiones

7.10.1. Sobre el recurso biomasa forestal

- La superficie de montes repoblados de las distintas especies de pino en Castilla y León es una fuente importante de materia prima para posibles proyectos de centrales de biomasa. Respetando las normas selvícolas de gestión forestal, y atendiendo a las pendientes que permitan la mecanización del aprovechamiento, **existen muchos montes potencialmente aprovechables**.
- Se han determinado **curvas representativas** de las masas estudiadas que muestran cómo el peso de biomasa por árbol crece potencialmente con su diámetro.
- El aprovechamiento de árbol completo supone, en los pinos jóvenes, un incremento medio del 35 % de utilización de biomasa por árbol frente al aprovechamiento de fuste hasta 7 cm de diámetro en punta delgada para madera.
- Se debe evaluar el impacto de retirar parte de los nutrientes en el sistema de árbol completo en función del tipo de suelo. **Son suelos muy sensibles y poco recomendable la extracción los ácidos de pH < 4,5 en el horizonte A, con texturas gruesas o medias (arenosos, arenoso – limosos). En el resto de suelos, es importan-**

te espaciar la extracción a periodos de más de 30 años y nunca más de dos extracciones por turno.

7.10.2. Respecto a la planificación previa

- Un aprovechamiento rentable de biomasa debe reunir la cantidad total suficiente de materia prima que rentabilice los desplazamientos, que en Portugal estiman en 500 t; además, debe existir un densidad de biomasa a extraer superior a las 40 ó 50 t/ha, según fuentes escandinavas.
- La distancia del monte al centro de acopio determinará el coste de transporte. **Si esta central está a menos de 20 km conviene transportar la biomasa bruta directamente.** Si la distancia es mayor, conviene procesar la biomasa, aumentando así la densidad aparente, y transportar en camiones de piso móvil, en este caso las vías de acceso al monte deben permitir la entrada a camiones *trailer* o con remolque hasta el mismo cargadero.
- **El astillado en monte supone alrededor de 8 €/t.** Este coste es mucho menor si la operación se hace en fábrica. La decisión de realizar esa operación en monte o en fábrica dependerá de la calidad exigida por el consumidor final y la distancia de transporte, fundamentalmente. Otros factores empresariales, como la propiedad de medios de transporte propios, existencia de retornos que abaraten los portes..., también influirán.
- **En montes con problemas de acceso o en época invernal, las principales opciones de transporte son los camiones rígidos de tipo bañera y los camiones *multilift* de contenedores, estos últimos serían idóneos para evitar descargar las astillas en el suelo. Si hay poco espacio de cargadero, son útiles los contenedores de carga lateral.**
- **En montes con cargaderos grandes y buen acceso, o en época de verano, los medios más económicos de transporte de astilla son los camiones de piso móvil de alta capacidad, que suelen requerir un medio auxiliar para su carga –cargador telescópico o pala de alto volteo– si la logística no es lo suficientemente buena para permitir ruedas continuas y astillado directo.**
- **El aprovechamiento de árbol completo es un esquema de trabajo que se puede adaptar a las claras de pinares de Castilla y León.** Las cosechadoras y los autocargadores existentes son válidos para ejecutarlos. Sin embargo, se pueden hacer adaptaciones para aumentar los rendimientos.

7.10.3. Respecto al apeo y reunión

- El medio de apeo idóneo, de acuerdo con las experiencias en otros países, sería, para pies muy pequeños, la motosierra montada en un armazón de aluminio. En condiciones fisiográficas buenas, **para pies algo mayores (8 a 12 cm), se recomienda el uso de máquinas ligeras con cabezal multitallador.** Para pies de mayor tamaño, sería recomendable el uso de cosechadoras (“procesadoras”) convencionales, a las que se puede acoplar algún accesorio para acumular los pies cortados.

- La polivalencia de las cosechadoras convencionales, potentes y con cabezal procesador hace difícil que pequeñas empresas forestales opten por cosechadoras más específicas y adaptadas al esquema propuesto con menor coste por tonelada, al menos hasta que no se consolide la demanda de biomasa. **El factor con mayor influencia en el rendimiento de la operación de apeo y apilado es el diámetro medio extraído, con aumentos de 2 cm se aumenta el rendimiento hasta en un 50%.**
- **El apeo y reunión mecanizados es la operación más costosa, por tanto se debería mejorar el rendimiento de esta operación,** que en las experiencias estudiadas osciló entre 7 y 9 t/h en verde y considerando todo el tiempo de presencia. La incorporación de nueva tecnología, garra acumuladora, o el ensayo de nuevos sistemas de trabajo: menos intensidad de clara/clareo en la zona de entrecalles y calles más próximas, reunión de los pies paralela a la calle cuando sea más ventajosa, etc. puede mejorar la productividad
- **Existe un escalón técnico en la altura media de los árboles extraídos en 15 m. A partir de esta altura se hace necesario un corte extra de la cosechadora, lo que conlleva una pérdida de rendimiento del 50 %.** Por tanto, si la calidad del fuste lo permite, se debe contemplar el aprovechamiento combinado de biomasa y madera con destino en la industria de palé.

7.10.4. Respecto al desembosque

- Los autocargadores usados en la actualidad en Castilla y León, con pequeñas adaptaciones, podrían aumentar su rendimiento de saca, abaratando el coste final. Se han sugerido teleros extensibles o paneles laterales compresores que aumenten la capacidad volumétrica de carga y cabezal de grúa de mayor capacidad (para árboles completos, mejor que tipo pulpo, no así para restos de corta). **Para las experiencias estudiadas los rendimientos máximos fueron de 12 t/h cuando la distancia de desembosque era de 50 m.**
- **Cada 100 m más de distancia de desembosque suponen un incremento de 1€/t en el coste final de la astilla.** Montar uno o varios cargaderos para disminuir esta variable dependerá también del sistema de transporte de la posible astilladora.
- **Los pies se deben cargar a lo largo y con la coz por delante. La carga debe ser cuidadosa para evitar daños, y no se debe tratar de recoger el 100% de la biomasa existente,** dado que se pierde demasiado tiempo en intentar apurar recogiendo ramas rotas, pies fragmentados, etc., que pueden quedar en el terreno, reduciendo además el riesgo de incorporar piedras o arena.
- **En la carga y la descarga, si hay riesgo de piedras o arena, se debe sacudir el fajo de árboles con la pinza.**
- **La pila de cargadero, si se va a astillar, se dispondrá con la coz mirando hacia la posición de la astilladora, con pies transversales en la base y sin superar en altura la de la cabina de la astilladora.**
- El autocargador, por su menor aportación al coste unitario, debería asumir las pérdidas de rendimiento derivadas de una mejora en el apilado, subiendo en altura, y una reunión “más desordenada” por parte de la procesadora.

7.10.5. Respeto a los cargaderos

- **Las pilas de madera deben estar en lugar accesible desde pista forestal, para facilitar su astillado y la posterior carga de camiones. La altura de apilado será en torno a 2,5 m y se apilarán los árboles con la coz apuntando a la zona de astillado.**
- Para saber si el espacio disponible es necesario para el cargadero de árboles completos y la maquinaria de astillado o triturado se debe tener en cuenta que **para una pila equivalente de 500 t de astillas en verde serían necesarios al menos 120 m² de superficie, con una altura de pila de 2,5 m.** Además, **hay que sumar el espacio para poner la astilladora y camión con grúa, 170 m², y los montones de astillas (en caso de descargar la astilladora en el suelo), 1.315 m².**

7.10.6. Respeto al astillado

- **Es importante que la operación de astillado coincida en el tiempo con el resto de operaciones,** es frecuente el apoyo entre los distintos operarios y máquinas ante las continuas dificultades derivadas del trabajo en monte.
- Se ha comprobado que **las astilladoras con potencia igual o superior a 300 CV son suficientes para el astillado de árboles completos, de diámetro de hasta 30 cm. La suficiente longitud y anchura de la bandeja de alimentación es una característica muy importante.**
- **La trituradora de martillos alcanza mayor rendimiento que la astilladora, 31 t/h frente a 14 t/h en verde y sobre tiempo de presencia, además es menos exigente en mantenimiento, sin embargo la calidad del material es mucho menor. Una u otra opción debe considerar el tipo de consumidor.**
- Si se opta por la elaboración de la biomasa en cargadero, **dado el riesgo reducido de piedras en la saca cuidadosa de árboles completos con autocargador, se recomienda el astillado con astilladoras de cuchillas sobre tambor, con potencias elevadas.**
- En principio, **para montes de cierto tamaño, el esquema más económico y con un producto final de mayor calidad es el de astillado fijo (en cargadero) usando una astilladora con motor propio sobre camión, si bien eso requiere un cargadero de dimensiones suficientes.**

7.10.7. Respeto a las astillas

- **El poder calorífico de los pinos silvestre y resinero es alto, entre 4.500 y 4.600 Kcal/kg en material seco, aunque las humedades de la biomasa verde son también altas, entre 50 y 60% sobre peso fresco.** El pino resinero tiene mejor calidad energética que el silvestre por su menor humedad. Según la estación del año y la forma de pago de la biomasa, **la permanencia en monte de la astilla puede ser una opción rentable que haga más productivo el sistema en su conjunto.**
- **El residuo después de la combustión es muy bajo, un 0,5% sobre peso verde, es**

El aprovechamiento integral de biomasa en claras sobre repoblaciones

decir que por cada tonelada se generan 5 kg de ceniza en el silvestre y 9 en el pinaster, que habría que gestionar. Una central con un consumo de 100.000 toneladas anuales produciría 500 y 900 toneladas para cada especie. Esta ceniza debería ser devuelta en forma de enmiendas a los montes de donde es originaria la materia prima.

7.10.8. Respecto al coste

- **El coste de extracción de biomasa en sistema de árbol completo y astillado en cargadero para claras/clareos de diámetro medio de extracción de 11 cm es inferior a los 40 €/t puesto en fábrica.** Esta cifra incluye costes indirectos y de estructura, así como los beneficios de la empresa de suministro, pero no la retribución a la propiedad de la biomasa en pie.

7.10.9. Respecto a los aspectos medioambientales

- Por razones medioambientales –extracción de nutrientes y pérdidas de fertilidad–, se **considera conveniente dejar secar la biomasa en monte antes de su extracción.**
- **En montes con suelos muy ácidos de texturas arenosas o arenoso-limosas, no se debe extraer toda la biomasa de los árboles salvo que se fertilice adecuadamente a continuación.**
- **En suelos ácidos sobre texturas arenosas a francas, no se recomienda repetir las intervenciones de extracción de biomasa cada menos de 30 años,** salvo fertilización posterior.
- **Hay que tomar precauciones, en todo caso, para reducir la erosión, especialmente en terrenos pendientes, y para minimizar los daños a los árboles que quedan en pie.**

7.10.10. Respecto a la seguridad y salud

- Además, hay una importante serie de **normas para garantizar la seguridad y salud** en los trabajos de recolección de biomasa, que **deben ser conocidas y respetadas por los operarios de estos trabajos.** En el capítulo correspondiente de este manual, se recogen las normas aplicables a las diferentes máquinas y operaciones de aprovechamiento de biomasa.

EL APROVECHAMIENTO DE TOCONES COMO BIOMASA PARA USOS ENERGÉTICOS

8.1. Fases de los trabajos, equipos y secuencia de las operaciones

El aprovechamiento de tocones consiste en la extracción de la parte subterránea del árbol para su uso como biomasa con fines energéticos.

En Finlandia y Suecia, se llevaron a cabo estudios de este tipo de aprovechamiento durante las décadas de los 70 y los 80 del pasado siglo, concluyendo que el coste era excesivo. A finales de la década de los 90 se retomaron las experiencias por esta línea y, en la actualidad, se considera una fuente de combustible con grandes posibilidades. De hecho, está aumentando enormemente el uso de este tipo de combustible en las centrales combinadas o de cogeneración (CHP, *Combined Heat and Power*) que disponen de sistemas de trituración (Kalliota y Markilla, 2004).

Recuperar los tocones para su uso energético puede ser interesante, ya que el sistema radical representa un porcentaje importante de la biomasa total del árbol y su extracción puede ser favorable de cara a la repoblación (Spinelli *et al.*, 2005). Además, la biomasa del sistema radical en muchas ocasiones tiene un mayor “contenido energético” que el fuste, por lo que se puede obtener de ésta un mejor combustible (Nurmi, 1997 –citado en Spinelli *et al.*, 2005–).

Por otro lado, la extracción del sistema radical es beneficiosa en determinados casos para la preparación del suelo para la regeneración, además de evitar la propagación de enfermedades fúngicas que se propagan a través de las raíces (Kalliota y Markilla, 2004).

En muchas ocasiones la extracción de los tocones es necesaria, al margen del posterior uso que de ellos se vaya hacer, como es el caso de las obras públicas, reforestación de eucaliptos o chopos tras cortas finales. En el caso de las choperas, el destocoñado se puede considerar incluso como un servicio para el propietario, por lo que no debería aplicársele ninguna retribución adicional como pago por la materia prima (Spinelli *et al.*, 2005). De hecho, el coste del destocoñado en una chopera supone entre un 8 y un 10 % del total de costes asociados a la gestión y mantenimiento de esta durante todo el turno (Calleja Sánchez, 2007).

Por último, el aprovechamiento de biomasa radical supone el uso de un material residual al que en la mayoría de las ocasiones no se le da ningún uso industrial, por lo que en principio no supone una competencia para la materia prima de las fábricas de tablero.

En Finlandia, el aprovechamiento de los tocones en cortas finales de pino y abeto está muy extendido (Kalliota y Markilla, 2004). Los métodos de producción en los países escandinavos, donde este tipo de intervenciones tiene más tradición y está creciendo en los últimos años, se muestran en la *Figura 181*.



Figura 181: Método de producción del aprovechamiento de los tocones en los países escandinavos (Fuente: adaptado de Hakkila, 2004).

Una descripción detallada de las operaciones y secuencia en el sistema finlandés es la siguiente (Sikanen *et al.*, 2005), cuyas fases se ilustran en la *Figura 182*:

- 1.- Extracción del tocón con retroexcavadora con un apero diseñado para partir el tocón en varios trozos.
- 2.- Acopio con un autocargador convencional adaptado para el transporte de tocones.
- 3.- Depósito de los tocones en cargadero. En esta fase del aprovechamiento cobra mucha importancia dejarlos allí para que pierdan contenido en humedad y desprendan arena y piedras por efecto de la lluvia, lo cual mejora la calidad del producto como combustible.
- 4.- Transporte de tocones desde el cargadero en piso móvil con la mayor capacidad posible (90 m³).
- 5.- Triturado de los tocones en terminal logístico o planta con trituradora móvil y opcionalmente con pretrituradora.
- 6.- Transporte de astillas a planta.

En España, por el momento son muy pocas las empresas que han comenzado a explotar este recurso. En comparación con el sistema de trabajo que se utiliza en los países nórdicos, donde el 80 % de los tocones que se recogen se transportan a planta y allí son triturados, en las experiencias estudiadas por CESEFOR y la U.P.M. durante el año 2007, los tocones eran pretriturados para posteriormente ser transportados a planta, donde se procedía a cribarlos y triturarlos.

Un esquema del tipo de aprovechamiento que se lleva a cabo en España y ha sido estudiado y descrito en este Manual se presenta en la *Figura 183*.

No obstante, en las experiencias industriales más desarrolladas en plantaciones de los alrededores de la fábrica de ENCE en Huelva –por cambio de cultivo a los nuevos clones de

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos



Figura 182: Fases del aprovechamiento de tocones. Fotos tomadas de Sikanen et al., 2005.

Eucalyptus globulus–, o en Extremadura, por cambio de especie –casi siempre a pinares o masas mixtas– a partir de antiguas plantaciones de la misma especie o de *E. camaldulensis*, se sigue una secuencia de operaciones para el aprovechamiento de los tocones que es similar a la típica de los países nórdicos, con la diferencia de que se deja pasar unos meses entre la extracción de los tocones, con retroexcavadoras dotadas de aperos especiales con varias puntas, y su cizallado, con una cizalla de gran tamaño en punta de grúas pesadas, acopladas

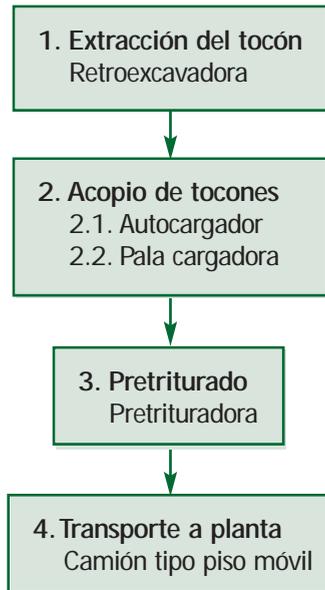


Figura 183: Esquema del aprovechamiento de tocones estudiado en España.

a camiones, retroexcavadoras o cargadoras, para que este cizallado dé lugar a un mayor desprendimiento de inertes (piedras y arena).

8.2. Evaluación del recurso

En España, el aprovechamiento de la biomasa procedente de tocones sólo tiene sentido en aquellos lugares en los que se realizan cortas a hecho, como en algunas masas de pinares, los eucaliptares y las choperas. Para tener una idea de la cantidad de biomasa que ello supone, se dispone del peso (kilogramos de materia seca, kg M.S.) por diámetro del árbol (CD) de la biomasa radical del chopo y del pino silvestre y pinaster (Montero *et al*, 2005), que se muestran en la *Tabla IXL*.

208

La biomasa de estas especies supone entre un 20 y 25 % de la biomasa total en peso. Esto se traduce, como media, en unas 50 t/ha para el chopo y 35-40 t/ha para el pino aproximadamente. Para masas de pino con una densidad de 400 pies/ha, se estima una producción energética entre 140-160 MWh por hectárea (Kalliota y Markilla, 2004).

Un factor muy importante a considerar a la hora de la extracción del tocón es la forma del sistema radical característico de cada especie. Siguiendo la clasificación de los sistemas radicales de Balgañón (2000), se pueden distinguir cinco tipos:

- **Tipo I:** Raíz principal penetrante, secundaria poco desarrollada
- **Tipo II:** Raíz principal y secundaria poco profundas. **Raíz secundaria poco desarrollada.**
P. pinaster y *sylvestris*
- **Tipo III:** Raíz principal poco profunda y secundarias más profundas que principal.

CD (cm)	Chopo I-214		<i>P. Pinaster</i>		<i>P. Sylvestris</i>	
	biomasa radical (kg M.S.)	% sobre biomasa total	biomasa radical (kg M.S.)	% sobre biomasa total	biomasa radical (kg M.S.)	% sobre biomasa total
5	0,7	17,95	1	26,32	0,7	15,45
10	4,6	19,09	5,1	24,40	4,6	17,52
15	14,5	20,77	13,4	23,55	13,4	18,82
20	32,5	21,92	26,5	22,90	28,6	19,79
25	61	22,91	45,1	22,47	51,4	20,57
30	102,1	23,76	69,5	22,08	83,1	21,22
35	157,7	24,47	100,3	21,77	124,5	21,78
40	229,8	25,10	137,8	21,51	176,9	22,28
45	320,3	25,66	182,2	21,26	241,1	22,72
50	431,2	26,18	234,1	21,05	318,0	23,13
55	564,2	26,65	293,6	20,86	408,6	23,50
60	721,1	27,08	361	20,69	513,6	23,84
65	903,7	27,48	436,6	20,53	633,8	24,15
70	1113,8	27,86	520,7	20,39	770,1	24,45

Tabla IXL: Comparación de valores modulares de chopo y pino (INIA).

- **Tipo IV:** Raíz principal y secundaria poco profundas. **Raíz secundaria desarrollada.**
Populus sp
- **Tipo V:** Todas las raíces someras

Según esta clasificación, los pinos silvestre y pinaster están en el Tipo II y el chopo en el tipo IV, tipos ilustrados en la *Figura 184*. La forma de la raíz influye directamente en el rendimiento y eficiencia en el destocoado, ya que las partes del sistema radical con una sección inferior a 5 cm. son difíciles de extraer con la retroexcavadora.

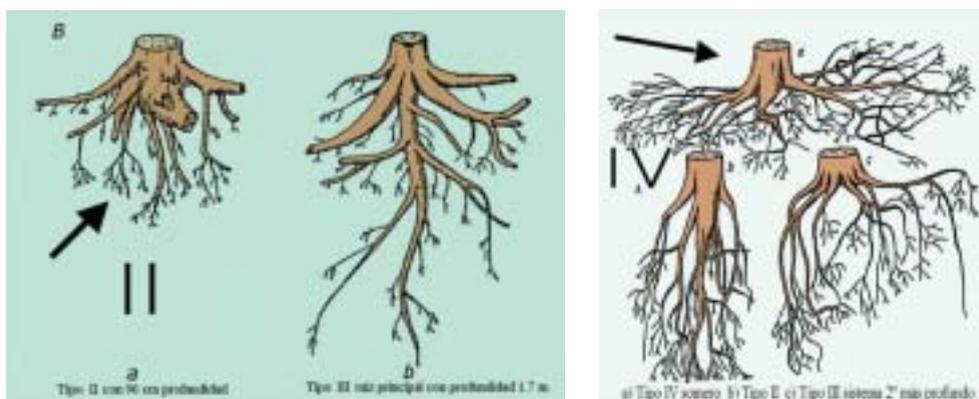


Figura 184: Esquema de los tipos de enraizamiento (Balgañón 2000).

La forma y el volumen del tocón también se verán modificados por diversos factores como la **profundidad del suelo**, que puede venir limitada por la existencia de una capa de

roca subyacente no fisurada, por la formación de una capa impenetrable a las raíces, o la existencia de una capa freática con una lámina de agua permanente o existente durante largos periodos, en la que no pueden penetrar las raíces a causa de la carencia de oxígeno para respirar. Otro factor importante es la **competencia de otras raíces o la edad**.

8.3. Breve descripción de las principales experiencias estudiadas

Se han estudiado de forma integral tres aprovechamientos de tocones durante el año 2007, los cuales se describen a continuación.

- **Sistema 1;** Destoconado con retroexcavadora y acopio de tocones de pino silvestre dentro de las obras de apertura de una pista forestal en Vinuesa (Soria).
- **Sistema 2;** Destoconado, acopio y pretrituración de tocones en una chopera en Carrión de los Condes (Palencia).
- **Sistema 3;** Acopio de tocones de pino resinero, pretrituración y carga en camión en un tramo de las obras de la autovía Soria- Almazán.

En los tres aprovechamientos, la empresa ejecutora fue AECO (Aprovechamiento Ecológicos S.A.). Esta empresa llevó a cabo los trabajos de pretrituración de los tocones y subcontrató o alquiló las máquinas para el destoconado y el acopio.

8.3.1. Sistema 1

Tras la corta de los pinos a lo largo del trazado de la pista, se procedía a la **extracción de los tocones** y **apertura de la pista** con una **retroexcavadora CASE cx210** (Figuras 185 y 186). El destoconado se realizaba con el cazo y, una vez extraídos los tocones, eran volteados y sacudidos para eliminar parte de las piedras y la arena que pudieran tener, y depositados en pequeños montones a los lados de la pista.

Para el acopio de los tocones se utilizaba un **autocargador Timberjack 1210** (Figuras 187 y 188), que iba recogiendo los tocones y depositándolos en un cargadero, para posterior-



Figuras 185 y 186: Trabajo de la retroexcavadora en la extracción de tocones



Figuras 187 y 188: Autocargador acopiando tocones

mente ser triturados. El triturado de los tocones no se llevó a cabo tras el acopio porque se decidió esperar hasta el año siguiente, con el fin de que se asentara el firme de la pista antes de llevar la trituradora, y además para dejar que los tocones pierdan tierra y piedras por acción de la lluvia y las nieves.

Los tocones que se iban a triturar, después de ser extraídos por el autocargador, quedaron agrupados en 5 montones, distribuidos homogéneamente a lo largo de la pista

La máquina empleada para el tratamiento de la biomasa fue una **pretrituradora Hammel 750 DK** que se alimentaba a través de una tolva que permitía un ángulo de elevación para facilitar la alimentación y la ruptura del material a través de tornillos de movimiento lento dispuestos longitudinalmente. El material procesado era expulsado a través de una cinta transportadora.

Para la alimentación de la pretrituradora se utilizó el mismo autocargador que llevó a cabo el acopio de los tocones (*Figura 189*).



Figura 189: Autocargador alimentando a la pretrituradora

8.3.2. Sistema 2

La chopera se utilizó como zona de demostración con motivo de la feria Expobioenergía 2007. El **destoconado** se realizaba con una **retroexcavadora Daewoo 330** (Figura 190), que extraía los tocones y los agrupaba en pequeños montones. El **acopio** de los tocones en esta experiencia se llevó a cabo a través de diferentes sistemas:

- Primeramente, con una **pala cargadora**, que iba recogiendo los montones y los depositaba en un cargadero donde podía trabajar la pretrituradora. Este método de trabajo presentó el inconveniente de que se recogía mucha tierra con los tocones y se transportaban pocos tocones al cargadero.
- Se buscó una alternativa y se optó por traer un **volquete de áridos** o **camión tipo dumper** (Figura 191) de pequeña capacidad (14 m³ aproximadamente), que cargaba los tocones que eran recogidos por la pala, se desplazaba al punto de acopio y los descargaba. El inconveniente de este sistema de trabajo es la lentitud de este vehículo, tanto en los desplazamientos como en elevar el **dumper** para volcar los tocones. Para agilizar el trabajo, la misma pala cargadora que cargaba el **dumper** llevaba tocones al cargadero en el tiempo que el **dumper** iba y volvía del mismo.



Figuras 190 y 191: Retroexcavadora extrayendo tocones (izquierda) y volquete de áridos durante el acopio.

212

- Por último, de manera excepcional, se realizó acopio de tocones **con el cazo de una cargadora de brazo telescópico de alto volteo**, de la marca **Manitou, modelo MT 940 LT**. Esto se hizo así con el fin de tener preparados tocones suficientes para alimentar a la trituradora en el momento de la visita de Expobioenergía, empleándose esta cargadora excepcionalmente, como medio de refuerzo ante una circunstancia muy particular.

El pretriturado de los tocones se hacía con una **pretrituradora Hammel DK 750** (Figura 192) que era **alimentada con la cargadora de brazo telescópico Manitou 940 LT**, equipada con una pinza con la que recogía los tocones del montón de acopio y los depositaba en la tolva de la pretrituradora. El material pretriturado era expulsado a través de la cinta transportadora.

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos

Por último, con motivo de la feria Expobioenergía 2007, se probó una criba de estrellas **Komptech Multistar M3**, para hacer una primera limpieza del producto según salía por la cinta de la trituradora.



Figura 192: Disposición de las máquinas en el pretriturado de tocones.

8.3.3. Sistema 3

Con motivo de las obras destinadas al tramo de la nueva autovía entre Soria y Almazán, se había realizado la corta de una masa de pino con algunos pies de encina, y se aprovechó esta circunstancia para estudiar el aprovechamiento de los tocones que ya habían sido extraídos con anterioridad.

El **acopio** de tocones, situados en pequeños montones a lo largo de todo el tramo, se realizó con un autocargador **Timberjack 1210** (el mismo del sistema 2). Una vez llena la caja, el autocargador se desplazaba a las zonas de cargadero, donde descargaba los tocones en el suelo o sobre la tolva de la trituradora.

El **pretriturado** de los tocones se realizó con la pretrituradora **Hammel DK 750** (Figura 193). El autocargador cogía los tocones de su caja o del montón de acopio (Figura 198) y los depositaba en la tolva de la pretrituradora. La tolva de la pretrituradora se puede inclinar para facilitar el paso del material por los tornillos (Figura 194).



Figuras 193-194: Autocargador descargando sobre la tolva de la pretrituradora (izda.); detalle de la pretrituradora (dcha.).



Figuras 195 y 196: Detalles de la cinta transportadora expulsando el material (izda.), y de los tornillos con muelas de la pretrituradora (dcha.).

8.4. Consideraciones previas al aprovechamiento de biomasa

8.4.1. Selección del lugar del aprovechamiento

Como se ha venido señalando en apartados previos, seleccionar o desechar un lugar de trabajo dependerá de las siguientes características, que se procede a comentar para el caso del aprovechamiento de tocones que se describe:

- **El tamaño y la homogeneidad del aprovechamiento.** Estos son factores de primer orden, dado que cuanto más grande y más homogéneo es un lugar de aprovechamiento, mayor es la productividad. Los montes pequeños con frecuencia no resultan rentables, especialmente si el sistema es mecanizado y se opta por triturar en el cargadero puesto que los costes de transporte de la pretrituradora son muy elevados.
- **La carga de biomasa a extraer por hectárea.** La cantidad de biomasa a extraer estará en torno a una media de 50 t/ha para el chopo y 35-40 t/ha para el pino, variando en función de la densidad de la masa, su edad y características del lugar. Si se supone un contenido energético de 2,6 MWh/t (poder calorífico que corresponde en realidad a la astilla de la parte aérea, que se considera menor que el de la biomasa subterránea) se tendría, como mínimo, una media en torno a 95 MWh/ha en pinares y 130 MWh/ha en choperas (Spinelli *et al.*, 2005).
- **Pendiente.** Una pendiente por encima del 30 % impediría la mecanización. Además, hay que tener en cuenta que el destocoado en zonas de elevada pendiente podría causar problemas de erosión y pérdidas de suelo que deben ser evaluadas, al quedar el terreno totalmente expuesto. En cualquier caso, dadas las características de las áreas en que se realizan este tipo de trabajos (infraestructuras o plantaciones de chopo), no son de esperar en principio estas situaciones de excesiva pendiente.
- **Distancias de desembosque.** Se requiere que las distancias de desembosque no sean excesivas y que haya un lugar con espacio suficiente para cargadero –cosa que no suele ser un problema ni en cortas para infraestructuras ni en choperas–, y que se pueda

garantizar que esté en buen estado durante la época que se vayan a cargar los tocones para su transporte a planta.

- **Distancia de transporte a la central consumidora o centro logístico de postproceso.** Esta distancia de transporte condicionará la rentabilidad del aprovechamiento, debiéndose seleccionar adecuadamente tanto el método de tratamiento de la biomasa bruta como su forma de transporte. Es tan importante este apartado que se tratará en detalle más adelante.

8.4.2. Planificación previa

Una de las primeras decisiones a tomar en un aprovechamiento de la biomasa forestal es la **elaboración que se va a dar a la biomasa** antes de entregarla al demandante. La decisión dependerá de las capacidades y especificaciones que la empresa de destino imponga. Los tipos de empresas y las exigencias que tienen serán los siguientes:

- **Pequeño consumidor** para producir **calor y/o electricidad**. Las mayores exigencias son en aplicaciones térmicas a escala doméstica o de pequeños colectivos que exigen astilla limpia, de granulometría pequeña y lo más seca posible
- **Gran consumidor** para producir calor y/o electricidad o **terminal logístico o centro de almacenamiento y procesado** con capacidad de procesar la biomasa. Admitirá cualquier categoría de biomasa, aunque se pagará a diferente precio en función de la humedad, tamaño y homogeneidad de las partículas, contenido en impurezas, etc.

La segunda implicación de **procesar o no la biomasa en el monte** o cargadero es que el procesado abarata el coste de transporte, pero supone en sí un coste más elevado que en planta o terminal, e implica también mayores costes fijos por el transporte de máquinas y adecuación de cargaderos. La preparación de la biomasa es siempre más eficaz y barata en destino. Las distancias de transporte podrán ser cortas, para consumidores de tamaño medio o grande, sólo si la densidad del recurso es elevada, es decir, en zonas forestales con abundante posibilidad productiva en biomasa y sin otras importantes limitaciones para este aprovechamiento.

La tercera importante decisión es la elección, en su caso, de la forma de ese procesado en monte que, como el astillado queda descartado por el desgaste de cuchillas debido a la cantidad de tierra y piedras que contienen, será en todo caso una de las siguientes:

- **Pretriturar** con máquina de tornillo o tornillos lentos, se realiza cuando el contenido en impurezas es alto.
- **Triturar** con máquinas rotativas de martillos o dientes.

En los países escandinavos, en el 80 % de los casos transportan los tocones sin triturar en camiones de gran capacidad y los Trituran en la misma central con Trituradoras y pretritadoras en algunos casos. En España, en las experiencias de este tipo que se han estudiado, el triturado se hace en monte con una pretritadora, y después se carga el material pretriturado en camiones para trasladarlo a la central logística o directamente a planta, donde se limpia el producto de tierra y piedras mediante cribado y se Tritura (o se astilla) de nuevo para conseguir un producto que ya pueda ser introducido en las calderas.

8.4.3. Preparación y dimensionamiento de los cargaderos

Los cargaderos en el aprovechamiento integral de la biomasa deben ser relativamente grandes, al tener que servir para permitir la descarga de material (en este caso, tocones) por parte del autocargador u otro medio de extracción, el almacenamiento de esa pila, la carga directa de camiones o el triturado y carga de los mismos, para lo que deben tener espacio, además de para la pila y los propios camiones, para el movimiento con palas cargadoras, cargadoras con grúas tipo pulpo o cargadores telescópicos.

En el caso del aprovechamiento al que se dedica este capítulo, como se ha indicado, la disponibilidad de espacio suficiente no parece un problema, puesto que el aprovechamiento y posterior procesado se produce en lugares donde ha habido una corta a hecho y por lo tanto queda libre mucho espacio para ser utilizado como cargadero.

Las **características de los cargaderos** son las siguientes:

- Deben tener **buena capacidad portante**, dado que una pretrituradora puede pesar más de 30 t, mientras que un camión de piso móvil puede superar las 40 t en carga. Su superficie debe ser llana y se debe evitar a toda costa la presencia de rocas.
- Los cargaderos deben colocarse en lugares **donde puedan acceder camiones con tracción ordinaria**. En caso de no existir tales lugares, deberían planificarse los medios para que pudiesen entrar y salir sin dificultad, como añadir grava sobre el terreno.
- Cuando las condiciones de las pistas puedan ser deslizantes, no conviene situar los cargaderos en la parte baja de una larga cuesta arriba, porque un camión cargado necesita cierto espacio para acelerar antes de afrontar una subida
- Es conveniente tener en cuenta hacia donde expulsa la cinta transportadora de la trituradora el material procesado. Es recomendable que los camiones giren cuando estén vacíos y se coloquen en la dirección del transporte a planta antes de su carga, para evitar maniobras a plena carga (Allakangas *et al*, 1999).
- En resumen de todo lo anterior, **el acceso a los montes puede paralizar un trabajo forestal. Se debe tener en cuenta el firme de las pistas, su anchura, la pendiente y los radios de giro, así como la presencia de puentes u otros obstáculos que supongan limitaciones de gálibo**. En montes con dificultad de acceso –lo que es muy frecuente, al menos en alguna época del año–, los camiones deben ser apropiados para circular por caminos forestales.

La superficie necesaria para el apilado de tocones varía en función del sistema de trabajo:

- **Apilado en altura**, en cargadero. Se realiza normalmente en Finlandia para dejar los tocones secar entre 2 y 4 meses antes de ser transportados a la planta. La carga del camión se hace con grúa, por lo que los tocones se pueden apilar en altura como se aprecia en la *Figura 197*.
- **Amontonado sin apilar en altura**. Si los tocones van a ser pretriturados en campo, la alimentación de la pretrituradora se hace con la grúa del autocargador o con cargadora de brazo telescópico y se dificultan estas labores si se ha realizado el apilado en altura (*Figura 198*). La superficie ocupada por los tocones amontonados puede ser el doble que en el caso anterior.



Figura 197. Cargadero de tocones en Finlandia (Hakkila, 2004).



Figura 198. Vista de acopio de tocones (Sistema 2).

En el caso de la chopera estudiada, se reunían los tocones sin apilar en altura. Se necesita una superficie de **4-4,5 m² por tocón** en choperas de diámetro normal medio de 35 cm. Por ejemplo en una chopera con un marco de plantación 5x5, con 400 pies/ha, se necesita 0,16 ha de pila por hectárea de chopera. Si el sistema de acopio y de alimentación de la pretrituradora permitiera trabajar en altura, la superficie necesaria puede reducirse en más de un 50%.

La superficie necesaria para un tocón triturado es de 0,65 m² (3,8 m²/t), que para el mismo ejemplo serán 260 m² de pila/ha.

8.4.4. Elección del medio de transporte

- Los camiones rígidos empleados normalmente para transporte de áridos (“bañeras”) tienen mayor posibilidad de desplazarse en montes de peores condiciones de acceso, pero su capacidad no supera los 55 estéreos. Frente a éstas, la otra opción son los camiones semirremolques o *trailers* de piso móvil de alta capacidad de 85-90 estéreos. El problema de estos vehículos de gran capacidad es su movilidad en monte, por su amplio radio de giro y escasa adherencia en vacío.



Figura 199: Pila de tocones triturados (Sistema 3).

- Las choperas, en la mayoría de las ocasiones, son de fácil acceso, por lo que la opción mayoritaria de transporte es el camión de piso móvil con un remolque de gran capacidad.
- Para ser cargados de tocones sin triturar, los medios de transporte necesitarán una grúa, que puede instalarse en el mismo camión –lo que incrementa, lógicamente, su peso en circulación– o no, en cuyo caso es necesaria una máquina adicional, como un autocargador, para que cargue el remolque del camión. En el caso de transportar el material triturado, se hace precisa una pala cargadora.
- Se debe transportar el triturado cubierto con un toldo (que es obligatorio), para evitar que pueda esparcirse por caminos, carreteras..., y en caso de lluvia, evitar que se moje y que aumente su peso con el riesgo de superar el peso máximo permitido del camión).
- La densidad aparente del producto triturado es de **0,33 t/estéreo** con un 25 % de humedad (obtenido de los estudios realizados). Si para el transporte se utiliza un camión de piso móvil con una capacidad de 90 estéreos, el peso cargado sería de 30 t. Aunque el piso móvil sea carrozado en aluminio, se supera el peso máximo autorizado, lo que impide acoplar una grúa permanente al vehículo. Este hecho, junto con el aumento del poder calorífico y la limpieza de tierra que se produce, aconsejará, como se verá en mayor detalle más adelante, dejar secar los materiales entre las fases del aprovechamiento.
- El transporte de tocones puede suponer hasta un 40 % del coste total (Spinelli *et al.*, 2005). Se debe planificar el transporte para conseguir la máxima eficiencia (Laitila, 2007) considerando la localización del cargadero, el tamaño de los tocones, la altura de la pila y la posibilidad de maniobrar para el camión en la zona de carga.

8.5. Recomendaciones de ejecución. Rendimientos, valores observados y referencias

Algo muy importante que se debe tener presente en todas las fases de ejecución es la gran cantidad de tierra y piedras que acompaña a los tocones. Para conseguir reducir su presencia en el combustible elaborado, hay que tener en cuenta dos cuestiones:

- Cizallar los tocones, sea durante su extracción o, preferentemente, en fases posteriores a un primer secado, propicia que se desprenda buena parte de las piedras y tierra que contienen.
- En cada operación de manipulación del tocón, un buen manejo del mismo es esencial para que vaya desprendiéndose de estas impurezas, que hacen que disminuya el valor del producto. La manipulación del tocón durante cada una de las fases (destoconado, acopio y triturado) incluirá **sacudirlo y voltearlo** para eliminar parte de la tierra y piedras que lleve adheridas. En suelos arcillosos, los tocones extraídos contendrán una mayor cantidad de tierra, puesto que la arcilla tiende a adherirse a las raíces (Spinelli *et al.*, 2005). Por lo tanto, en este tipo de suelos habrá que prestar una especial atención a la limpieza de los tocones.
- **Dejar secar el tocón entre operación y operación:** entre el destoconado y el acopio, y entre el acopio y la carga en el camión o el triturado en campo. Lo primero es más

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos

difícil, ya que en general interesa recoger los tocones justo después de la extracción para no entorpecer la regeneración.

En definitiva, cuanto más secos y más limpios, mayor será la calidad del producto y más eficiente el transporte, puesto que se evita transportar piedras, tierra y agua.

8.5.1. Destoconado

A la hora de realizar el destoconado, el uso de retroexcavadora es un buen sistema. Estas máquinas deben tener una **potencia superior a 100 kW (136 CV)**. El elevado coste horario de las máquinas de mayor potencia se compensa por el aumento que se experimenta en el rendimiento (Spinelli, 2005)

El uso de **aperos especiales diseñados para facilitar esta actividad** mejoraría el rendimiento de destoconado, como los empleados en los aprovechamientos de tocones en Escandinavia. (*Figuras 200 y 201*). Estos cabezales adaptados favorecen además que los tocones se extraigan con menor cantidad de tierra y existe la posibilidad de implementarlos con cizallas que corten el tocón en varios trozos al tiempo que lo extraen del terreno. El hecho de partir el tocón es interesante porque facilita su manejo y apilado, acelerando su secado, además de favorecer, como se ha indicado, el desprendimiento de piedras y arena que están íntimamente ligados al sistema radical.



Figura 200: Detalle de una grapa Pallari KH 160 con una cizalla de corte vertical (Fraise, 2007).



Figura 201: Cabezal especial para destoconado (TEKES, 2003).

El cazo de la retroexcavadora es lo que más se ha venido empleando en los trabajos de destoconado qque se han estudiado en España (*Figura 202*), donde el aprovechamiento de los tocones no está muy extendido y por eso es difícil todavía encontrar aperos específicos para esta tarea, excepto en las mencionadas operaciones sobre los eucaliptares efectuadas por la industria de celulosa.

En las choperas, el destoconado y la apertura de huecos para plantar las estaquillas son trabajos que se hacen simultáneamente. En el agujero que queda de extraer el tocón se retira un poco más de tierra y se introduce la vara en la misma operación.



Figura 202: Cazo de una retroexcavadora.



Figura 203: Sistema radical de un chopo en el Sistema de trabajo 2.

Durante este proceso, también conviene voltear los tocones y sacudirlos para que eliminen la mayor cantidad de tierra y piedras posible. Por lo tanto es vital que el operario sea ágil en el manejo del cazo.

Para facilitar el acopio, es conveniente que la retroexcavadora deje los tocones en pequeños grupos según se extraen en vez de desperdigados por todo el terreno; aunque no sea su función, el alcance del brazo de su grúa le permitirá dejar los tocones agrupados. En los estudios llevados a cabo, se midió el trabajo de dos retroexcavadoras **sacando tocones de pino o chopo**, pero realizando trabajos diferentes, como se detalla a continuación:

- En el Sistema 1, la **retroexcavadora CASE cx210**, además de extraer los tocones, se encargaba de abrir la pista, allanando el terreno y eliminando las rocas.
- En el Sistema 2, la **retroexcavadora Daewoo330** se encargaba únicamente de destococonar la chopera.

Por tanto, comparar el rendimiento entre ambos sistemas no tiene razón de ser.

La potencia de estas máquinas, que generalmente trabajan en obra civil, es superior a la necesaria para la extracción de tocones, salvo en el Sistema de trabajo 1, donde existían rocas de gran volumen. La pedregosidad frecuente supone que hay que optar por máquinas de elevada potencia y peso, sobre todo en zonas sin problemas de compactación (cuando se va a ahoyar para hacer plantación o se va a construir una infraestructura).

220

En ambos escenarios se llevó a cabo un control de tiempos dividiendo el trabajo de las máquinas en operaciones elementales: desplazamiento, extracción del tocón, volteo del tocón, movimiento de tierras, movimiento de piedras... de los que se pueden extraer las siguientes **conclusiones y recomendaciones:**

- El tiempo empleado en el destococonado en cada uno de los sistemas es similar y aparece en la *Tabla XL*.

Extracción de tocones (seg/tocón)	
Sistema 1	14,3
Sistema 2	13,3

Tabla XL: Tiempo medio dedicado a la extracción de un tocón.

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos

- El peso medio del tocón, a igualdad de diámetro del árbol, es diferente para el pino del Sistema 1 y el chopo del Sistema 2 como se detalla a continuación:
 - El peso del tocón de pino fue de 66 kg (seco) ó 88 kg (verde).
 - El peso del tocón de chopo fue de 127 kg en seco ó 169 kg en verde.

Esta diferencia aumenta a medida que aumenta el diámetro como se aprecia en la *Figura 204*.

- El rendimiento medio de destocoado, sobre tiempo de trabajo, fue:
 - En el Sistema 1, de una tonelada de materia verde/ hora (14,55 tocones/hora). En este caso de apertura de una pista el destocoado es obligado, el trabajo adicional para su aprovechamiento como biomasa supone un incremento del tiempo inferior al 15%.
 - En el Sistema 2, de 67 tocones hora (11,3 t de materia verde al 25% de humedad). Aumenta debido a que la única labor que realiza la retroexcavadora es destoconar. En experiencias realizadas en Italia con un cabezal adaptado a este tipo de trabajos, se obtienen producciones mucho más altas, de hasta 150 tocones/hora (Spinelli *et al.*, 2005).
- Los tocones de chopo son demasiado grandes (*Figura 203*) para introducir en la pretrituradora. Se debería utilizar un cabezal que tras extraer el tocón pueda romperlo en varios trozos, de entre los diferentes modelos que hay en el mercado, o bien llevar a cabo un cizallado posterior.
- **La forma del sistema radical** influye en el trabajo de destocoado tanto o más que el peso. Alrededor de un 25 % del sistema radical queda en el suelo (Kallioti y Markilla, 2004), para el pino y el abeto. Las partes del sistema con un diámetro menor de 5 cm, en general no son extraídas quedando en el suelo. Las raíces secundarias están más desarrolladas en el chopo que en el pino, por lo que su extracción será más costosa quedando mayor proporción de biomasa en el suelo. Esto se compensa por el hecho de que las choperas están en terrenos mucho más cómodos de trabajar.

8.5.2. Acopio y apilado de tocones

Después del destocoado, y antes de recoger los tocones para apilarlos, es conveniente dejarlos entre 2 y 4 semanas sin moverlos, para que al secarse vayan perdiendo tierra. En este proceso, además de mejorar el rendimiento energético, se busca la limpieza del tocón, como se resalta en la introducción de este apartado.

8.5.2.1. Resultados de las experiencias estudiadas

En las experiencias estudiadas el acopio de tocones se realizó de diversas maneras:

- En los Sistemas 1 y 3, se hizo con un autocargador.
- En el Sistema 2, se probaron varias formas de trabajo con una pala cargadora y un volquete de áridos tipo *dumper* (*Figuras 205 y 206*).

En el **Sistema 2**, se comenzaron los trabajos de acopio con una pala empujadora que recogía los tocones con el cazo y los transportaba hasta el punto de acopio, pero se arrastraba

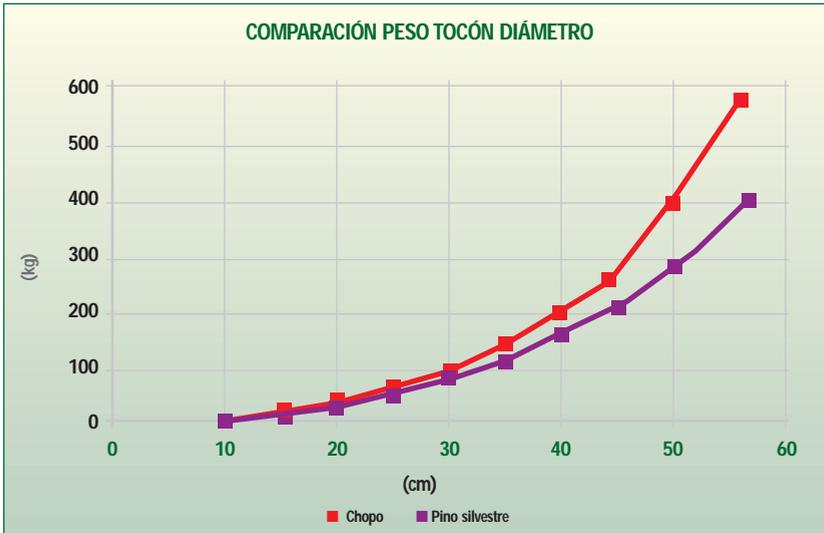


Figura 204: Relación peso/diámetro del chopo y del pino silvestre



Figuras 205 y 206: Pala empujadora (izda.) y dumper (dcha.).

gran cantidad de tierra. Se optó por cargar los tocones con esta misma pala en un camión de pequeña capacidad, tipo *dumper* y resultó ser un esquema de trabajo mucho más lento que la pala cargadora, el camión tenía mucha menos velocidad de desplazamiento y además tardaba mucho en descargar volcando los tocones en cada viaje. Finalmente, se combinó el trabajo de cargar el *dumper* con pala cargadora y, mientras el camión iba, descargaba y volvía, la pala trasladaba tocones al cargadero. En esta ocasión no se probó el acopio con un autocargador debido a que no se disponía de ninguno en ese momento.

222

Con los datos obtenidos del estudio y planteando una hipótesis lógica de rendimiento para el autocargador, se puede comparar los diferentes sistemas (*Tabla XLI*). En este ejemplo, la distancia media de desplazamiento se ha considerado de 250 m.

El sistema más rápido y más barato es acopiar los tocones con la pala, pero este sistema tiene el gran inconveniente de llenar los tocones de tierra. **Siempre se debe optar por sistemas que transporten el tocón sin arrastrarlo, como el autocargador.**

Al recoger los tocones con una pinza, estos transportan menor cantidad de tierra, lo que aumenta el rendimiento de la trituradora además de favorecer que se obtenga un producto más limpio.

	Pala	Dumper	Dumper + Pala	Autocargador
Nº tocones/h	121	32	93	75
Tonelada/h	18,1	4,8	18,1	4,9
Coste horario (€/hora)	66,5	47,3	113,8	70,3
Coste unitario (€/t)	0,5	1,5	1,2	0,9

Tabla XLI: Comparación entre diversos sistemas de acopio.

En los **Sistemas 1 y 3**, el **acopio de los tocones se hizo con el mismo autocargador** manejado por el mismo operario. En el Sistema 1, el autocargador iba desplazándose continuamente para recoger los tocones a lo largo de la pista forestal, donde estaban en grupos de 3 ó 4 tocones (*Figura 207*).



Figura 207: Autocargador recogiendo tocones en la pista forestal (Sistema 1).

En el Sistema 3, una pala cargadora había amontonado los tocones en grupos de entre 30 y 50 tocones, y el autocargador los recogía para acopiarlos en un gran montón. En ambos casos se hizo un cronometraje continuo. Un resumen de los resultados obtenidos en cada estrato se muestra en las Tablas XLIII y XLIV. El **rendimiento sobre tiempo productivo** es más del doble en la autovía que en la pista forestal (**7,15 t/hora en el Sistema 3 frente a 3,04 t/hora en el Sistema 1**).

Un factor clave que afecta al rendimiento es la **distancia de desembosque**. El tiempo empleado en el desplazamiento es el siguiente:

- En el Sistema 1, fue de 20 minutos por ciclo para una distancia media de 250 m.
- En el Sistema 3, fue de 5 minutos por ciclo para una distancia de 95 m.

	S1 (pista)	S3 (autovía)
Especie	P. silvestre	P. pinaster
Peso medio (kg/tocón)	98,9	185
Nº toc/ciclo	25	16
Tiempo productivo medio por ciclo (min)	39,1	22,1
Distancia media de desembosque (m)	250	95
Rdto (t verde/hora) sobre tiempo productivo	3,04	7,15

Tabla XLII: Características generales de los Sistemas de trabajo 1 y 3.

	S1 (pista)		S3 (autovía)	
	s1	s3	s1	s3
D. vacío	5,19	1,76	13,27	7,96
D entre cargas	3,10	0,33	7,93	1,48
D. cargado	3,78	2,34	9,67	10,59
CARGA	17,03	9,83	43,55	44,48
DESCARGA	10,00	7,84	25,58	35,48
TOTAL	39,10	22,10	100,00	100,00

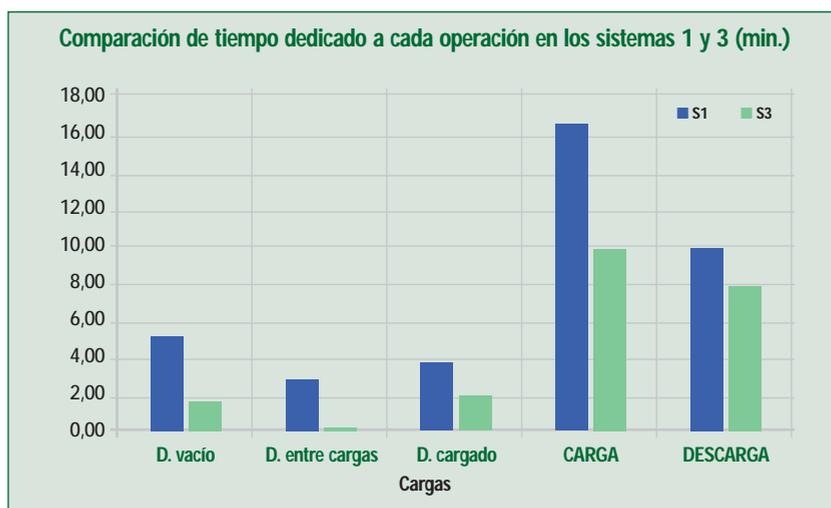


Tabla XLIII y Figura 208: Distribución de tiempo de las operaciones productivas en los Sistemas 1 y 3.

En el Sistema 1, el tiempo de carga (17,03 min.) es tan alto debido a que los tocones están desperdigados a lo largo de toda la pista, mientras que en el Sistema 3 el autocargador lo recogía de montones ya agrupados.

En cualquier caso, los rendimientos son muy inferiores a los que se pueden alcanzar con una tecnología adecuada, ya que este tipo de trabajos son pioneros en nuestro país y, en consecuencia, en muchas ocasiones no se dispone de la maquinaria adecuada ni se ha adaptado la maquinaria disponible suficientemente.

8.5.2.2. Recomendaciones generales relativas al acopio de tocones.

– En cuanto a la tecnología:

- Existen **pinzas tipo pulpo** (*Figura 209*) que facilitan la recogida de tocones. En cualquier caso, **la capacidad de la pinza debe ser lo mayor posible**, puesto que hay especies cuyo sistema radical es muy voluminoso, como el chopo.
- Se deben **utilizar grúas de largo alcance** que permitan cargar la mayor cantidad posible sin cambiar de posición.
- La **caja del autocargador** debe poseer una elevada **capacidad** de carga en volumen y, para evitar que los tocones caigan de la caja, se puede **disminuir la distancia entre los teleros**.

– En cuanto al sistema de trabajo:

- Debido a las características del material, es deseable que el maquinista tenga experiencia en el manejo de tocones.
- El tiempo que el autocargador emplea en el desplazamiento supone una parte muy importante del tiempo de trabajo. Por lo tanto, se deben situar los cargaderos en lugares accesibles para el camión o para la pretrituradora, de modo que, en lo posible, se minimicen los desplazamientos del autocargador.
- La forma de operar en la descarga de los tocones y su apilado dependerá de lo que posteriormente se vaya a hacer con ellos. Como se explica en el apartado de recomendaciones generales, si los tocones se van a cargar directamente en camiones sin elaborar se puede hacer un apilado en altura como el de la *Figura 210*. Si se van a triturar en el campo, la altura de la pila no debe dificultar el trabajo de la máquina que vaya a alimentar a la pretrituradora.

8.5.3. Pretriturado de tocones

En el caso de las experiencias españolas analizadas, el triturado de tocones se llevaba a cabo en el campo, mientras que en los países del norte de Europa donde este tipo de aprove-



Figura 209: Pinza tipo pulpo (Galmen, 2007).



Figura 210: Cargadero de tocones (Hakkila, 2004).

chamientos está más avanzado, optan por triturar los tocones en planta, puesto que las características de este tipo de material hacen que necesite un tratamiento mucho más complejo. Antes de introducir este material en una caldera, para eliminar la máxima cantidad posible de piedras y tierra, primero pasa por la pretrituradora, a continuación por una cribadora que separe el material vegetal del residuo y finalmente se tritura o astilla.

El ahorro que supone transportar el material pretriturado en vez de los tocones enteros no parece compensar, puesto que el desplazamiento de una máquina pretrituradora al monte es también muy costosa y su trabajo no tiene el rendimiento ni alcanza la calidad que podría tener en planta.

8.5.3.1. Resultados de las experiencias estudiadas

El pretriturado del material es la actividad que supone un mayor coste en las experiencias estudiadas. El coste horario de la pretrituradora es muy elevado.

En los tres casos descritos, se estudió el trabajo de la pretrituradora y se controlaron tiempos y rendimientos como se expone a continuación:

- En el Sistema 1, el rendimiento de la pretrituradora alimentada por un autocargador, fue de **7,85 t/hora de trabajo**, más bajo que otros rendimientos obtenidos para un sistema análogo, como el Sistema 3 de este mismo Capítulo. La distribución de los tiempos registrados se presenta en la *Tabla XLIV*.
- En el Sistema 2, en una chopera, una cargadora de brazo telescópico con una pluma acoplada (*Figura 197*) alimentaba a la pretrituradora (aunque parte del tiempo de trabajo lo empleó en descargar sobre una cribadora). Su rendimiento fue de **6,91 t/hora (40,91 tocones/hora)**.
- En el Sistema 3, un autocargador (*Figura 198*) alimentaba a la pretrituradora. Su rendimiento fue de **15,13t /hora (85,23 tocones/hora)**.

Las diferencias en el rendimiento de la pretrituradora, que es la de misma en los tres casos, se debe sobre todo al sistema de alimentación y al volumen de los tocones. El volumen de algunos tocones de pino y chopo (Sistemas 1 y 2) fue tan grande que resultó difícil el paso del material por los tornillos, lo que señala de nuevo hacia la probable utilidad del ci-zallado de los tocones.



Figura 211: Trituradora alimentada con cargadora de brazo telescópico (Sistema 2).



Figura 212: Trituradora alimentada por autocargador (Sistema 3).

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos

PRETRITURADORA		Tiempo (min)	Tiempo (%)	Producción (t/h)							
T. trabajo	Productivo (directo)	Despl. grúa a por carga	156	18,12	69,92	Tiempo productivo	10,76	Tiempo de trabajo	7,85	Tiempo de presencia	7,53
		Alimentación	291	33,80							
		Colocación bandeja	65	7,55							
		Colocación Montón	74	8,59							
		Procesa restos sueltos	16	1,86							
	Indirecto	Despl. trituradora	27	3,14	26,02	95,93					
		Calentamiento inicial	13	1,51							
		Maniobra	6	0,70							
		Pequeña avería	15	1,74							
		Necesidades maquinista	55	6,39							
		Interrupción	33	3,83							
		Planificación	7	0,81							
		Repostado	16	1,86							
		Espera triturado	52	6,04							
T. no operativo	No trituradora pero tiene		30	3,48	4,07	4,07					
	móvil		5	0,58							
Total		861	100	100	100						

Tabla XLIV: Tabla IUFRO en la que aparece expresado el rendimiento y la distribución de tiempos de las operaciones en el Sistema 1.

En el caso de alimentación con autocargador en el Sistema 3 (chopo), se probaron dos sistemas de trabajo diferentes. En el primero, el **autocargador cogía los tocones de una pila en el suelo, y en el segundo alimentaba directamente desde la caja del autocargador en vez de descargar en el suelo los tocones que había recogido**. El mejor resultado se obtiene cuando la alimentación de la pretrituradora se hacía directamente desde el remolque del autocargador (**13,63 t/hora frente a 20,07 t/hora**). Esto se debe a que el movimiento que llevaba a cabo la grúa era mucho menor.

El segundo sistema de trabajo, además de tener un rendimiento mucho más alto en la alimentación de la trituradora, presentaba la ventaja de que se ahorraba al autocargador el trabajo de tener que descargar en el suelo. El inconveniente de este sistema es el tiempo que la pretrituradora estaba esperando mientras el autocargador carga la caja de tocones, que en el caso estudiado suponía hasta un 78% de tiempo de trabajo en espera. Sin embargo, se puede plantear un sistema de trabajo en el que haya varios autocargadores alimentando a la trituradora, y mientras unos están recorriendo el tajo recogiendo los tocones, otro alimenta a la trituradora con la carga de su remolque.

En la siguiente gráfica (*Figura 213*), se compara la distribución porcentual de tiempo dedicado a cada operación de la trituradora en la pista de Vinuesa (Sistema 1) y en los trabajos de destocoado para la construcción de una autovía, donde la alimentación también se llevó a cabo con un autocargador (Sistema 3). Se observa cómo las operaciones que componen el tiempo productivo directo (desplazamiento de grúa y alimentación) son menores en los trabajos llevados a cabo en la autovía, por el menor tamaño de los tocones y por su mejor accesibilidad, ya que en la pista la pretrituradora se veía muy limitada para maniobrar con comodidad. La alimentación de la pretrituradora fue más eficaz en la autovía, con unos rendimientos que alcanzaron las 11 t/hora. En el desplazamiento entre montones la máquina

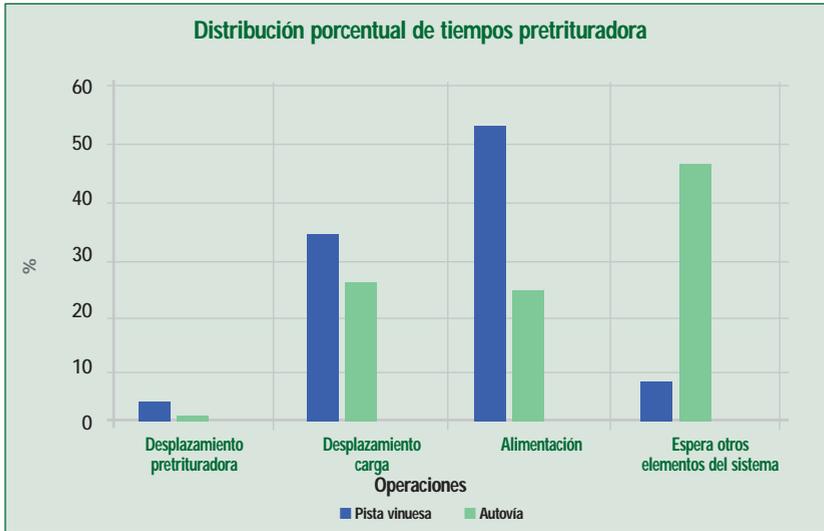


Figura 213: Comparación de los tiempos por operación de la pretrituradora Hammel en los Sistemas 1 (en rojo) y 3 (en verde).

avanzaba a 3 km/h, lo que supone un tiempo medio entre montones de aproximadamente 16 minutos.

En experiencias con tocones de eucalipto desarrolladas en Huelva con un procesado de tocones con una máquina CBI 6.800 de 1000 CV de potencia, se obtuvieron unos rendimientos de hasta 30 t/h (Jiménez, *et al.*, 2008). La mayor dificultad y la pérdida de rendimiento fueron debidas a las dimensiones de los tocones. Cuando un tocón conservaba raíces de gran longitud, el sistema de alimentación se mostraba incapaz para la pretrituración. En el *modus operandi* del pretriturado de tocones que se emplea en la provincia de Huelva para el eucalipto, previamente a la alimentación, se incorpora una máquina retro con un cabezal con cizalla que fracciona los tocones en partes más pequeñas. Teniendo en cuenta el tiempo de retraso por esta contingencia, el rendimiento puede aumentar en un 10 %. (Jiménez, *et al.*, 2008).

8.5.3.2. Recomendaciones generales sobre el pretriturado

228

- Para obtener un producto menos contaminado **el tocón debe estar lo más seco posible**, el tocón seco se tritura mejor y pierde tierra con mayor facilidad.
- **Para la alimentación, el empleo del autocargador es mejor que el de la cargadora telescópica** puesto que la grúa tiene una mayor movilidad y alcance de manera que se minimiza el desplazamiento del cuerpo de esta máquina.
- Al igual que en el acopio, es conveniente que **la grúa del autocargador tenga el mayor alcance** posible para cargar la mayor cantidad de tiempo sin necesidad de cambiar de posición.
- Las tareas deben organizarse de manera que la máquina este siendo alimentada durante el mayor tiempo posible, disminuyendo los tiempos de espera, ya que el coste horario de la pretrituradora es muy elevado.

8.6. Transporte de biomasa procesada a centro logístico

Esta operación sólo se controló en el Sistema 1 (pista de Vinuesa). El equipo estaba formado por una pala cargadora ligera tipo Manitou y dos camiones con remolque *multilift* con capacidad de transporte de dos contenedores cada uno de 36 m³.

En el monte se encontraba de forma permanente la pala cargadora. Los camiones *multilift* dejaban el remolque y uno de los contenedores al pie de la pista forestal. Subían con el otro contenedor vacío, lo descargaban en el suelo, esperaban a que fuera cargado y lo bajaban lleno. La pala cargadora era manejada por uno de los conductores de camión, por tanto sólo había dos operarios. Una vez llenos los dos contenedores, uno de los camiones los transportaba hasta la central de acopio en la ciudad de Soria.

El otro camión, junto con la pala cargadora, continuaba con el resto de contenedores.

La pista tenía un trazado de media ladera, con un talud de desmonte y otro de terraplén. La biomasa estaba agrupada en la mitad de la pista, junto al talud de terraplén, dejando un estrecho paso para vehículos. La pendiente no suponía un obstáculo ni para la pala ni para los camiones *multilift*. Las maniobras de carga tenían las siguientes dificultades:

- La pala cargadora debía recorrer siempre una distancia marcha atrás en el desplazamiento en vacío para cargar la pala.
- Los camiones no podían cambiar de sentido salvo en unos ensanches puntuales de la pista. Esto obligada a circular marcha atrás distancias de hasta 500 m.
- El contenedor no se podía colocar perpendicularmente a la trayectoria de carga de la pala, con lo que aumentaría el rendimiento, sino que debía de girarse para hacer posible la carga.
- Parte del material pretriturado quedó junto a la pista, en el talud de terraplén, por la imposibilidad de recogerlo.

8.6.1. Análisis del trabajo de la pala cargadora Manitou cargando los contenedores de material pretriturado

La máquina era manejada por uno de los conductores de camión. Así pues, para evaluar su rendimiento se ha separado del tiempo de trabajo los tiempos en los que la máquina estaba parada sin conductor (*Tabla XLV*).

TRABLA IUFRO TIEMPO PRODUCTIVO		
OPERACIONES	%	Productividad (t/h)
Desplazamiento con la pala cargada (marcha adelante)	21,1	21,0
Desplazamiento vacío (marcha atrás) de aproximación al montón de pretriturado	19,7	
Coloca montón pretriturado para recoger la mayor cantidad de pretriturado posible	18,3	
Operación llenado de pala en el montón de pretriturado	23,9	
Operación de descarga de pretriturado en el interior del contenedor.	14,1	
Operación de colocado del saliente de pretriturado en el contenedor	2,8	

Tabla XLV: Distribución porcentual de tiempos en las operaciones de trabajo de la pala cargadora en el Sistema 1.

El tiempo medio de carga de un contenedor fue de 32 minutos. Esta cifra es escasamente inferior a los 42 minutos que tardaría la misma pala en carga en terreno llano y amplio un camión de piso móvil de 96 m³. El rendimiento, en este último caso, asciende a casi el doble, 48 t/h.

La operación de colocar el pretriturado en el montón no consiguió recuperar todo el material del suelo, pero evitó que las pérdidas fueran mayores. **La eficacia de la recogida de la biomasa fue el 80 %, es decir que se estima que el 20 % quedó en el suelo.**

La pala cargadora estuvo el 52 % del tiempo de trabajo realizando las operaciones de carga, el 48 % restante estuvo parada esperando a los contenedores vacíos, según se puede apreciar de forma gráfica en la *Figura 214*.

8.6.2. Análisis del trabajo en la carga y transporte de material pretriturado de camiones Multilift (Sistema 1)

Los camiones tenían sistema *multilift* de carga y descarga de contenedores. El segundo contenedor lo llevaban como remolque. Los camiones recorrieron las pistas forestales en vacío con una velocidad media de 36 km/h. Esta alta velocidad se debía a que el estado de las pistas era muy bueno. La velocidad del camión cargado descendía a 23 km/h.

El desplazamiento por carretera secundaria tuvo una media de 45 km/h en vacío y 40 km/h cargado. En las carreteras autonómicas, la velocidad media considerando el viaje de ida cargado y de vuelta vacío, aumentaba a 75 km/h. El peso de la carga medio de los camiones fue de 19 toneladas en verde, distribuidas en los dos contenedores. La densidad aparente de la carga fue de 272 kg/m³.

Los camiones tuvieron la distribución de tiempos agrupados que se refleja en la *Figura 215*.



Figura 214: Relación tiempo de trabajo/ Tiempo de espera de la pala cargadora.

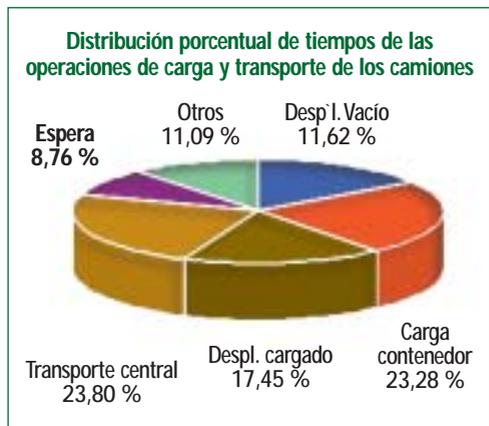


Figura 215: Distribución porcentual de tiempos de las operaciones de los camiones.

En la operación de espera, el camión estaba parado mientras la pala terminaba de llenar el contenedor del otro camión, este tiempo supuso un 8,76 % del tiempo total. Este valor se puede considerar muy bajo.

En este sistema se consiguió un rendimiento conjunto de 9 t/h sobre tiempo de trabajo. Resulta ser un sistema bastante eficaz, puesto que la máquina que mayor cantidad de tiempos muertos posee es la pala cargadora *Manitou*, con un coste horario bajo en comparación con el de los camiones, máxime si se tiene en cuenta que no necesitaba un operario, puesto que siempre era uno de los conductores de los camiones.

8.7. Recomendaciones relativas a la calidad de la biomasa

Las principales normas orientadas a obtener una biomasa de mayor calidad en el caso de los tocones son las siguientes:

- **Suministrar los tocones o el pretriturado con la menor cantidad posible de piedras y tierra.** Para conseguirlo hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:
 - **Voltear y sacudir el tocón** en cuanto se extraiga para disgregar la tierra y piedras. En su caso, puede ser muy efectivo trocearlo con una cizalladora.
 - **Dejar secar** 3-4 semanas para que se desprenda la tierra y piedras tras el destocado, realizar el acopio (en su caso, cizallándolos previamente), descargar en cargadero, dejar secar otras 3 o 4 semanas y luego proceder al pretriturado o transporte de la biomasa, siempre y cuando esto sea posible.
 - **No arrastrar los tocones con pala arrastradora**, al incorporarse más tierra. Cargar con grúa que permite manipular el tocón sacudiéndolo para desprenderse de más tierra.
 - Si se descarga el pretriturado en el suelo y se realiza la carga del pretriturado con pala se pueden incorporar impurezas, para evitarlos hay que procurar la **descarga directa al camión** –en caso de no poderse, buscar un suelo asfaltado próximo donde descargar la astilla, o **no apurar en la carga del pretriturado** cuando se recoja **de un suelo sin asfaltar**–.
- **Dejar secar biomasa y/o pretriturado para que el combustible llegue lo más seco posible a su destino, por el mayor poder calorífico.** Se procura un secado adicional de los tocones en el monte y en cargadero, siempre que esto no suponga riesgos fitosanitarios o de incendios. El 80% de la biomasa obtenida de tocones en los países del norte de Europa se trasladan a la central sin realizar el pretriturado en monte. Esta solución puede abaratar costes, al no ser necesario trasladar la pretrituradora al monte y, además, facilita el trabajo.
- En función del destino, el contenido en álcalis y en cenizas en general puede ser perjudicial y dar lugar a rechazos o penalizaciones. El **alto contenido en cenizas de algunos tocones, como en el caso del abeto, en que representan hasta un 24%, disminuye la calidad de este material como combustible** (Laitila, *et al.*, 2006).
- Según experiencias llevadas a cabo en Finlandia, **la biomasa de la parte subterránea del árbol contiene una densidad energética mayor que la parte aérea, llegando a 2,6 MWh/t en las experiencias realizadas en Italia** (Spinelli, *et al.*, 2005).

8.8. Estimación de costes del suministro de biomasa a partir de tocones

En la *Tabla XLVI* se muestra un resumen de los costes horarios de la maquinaria (en euros hora o €/h), rendimientos medios (en toneladas de materia verde hora o t M.V./h) y los costes unitarios (€/t M.V.). En el caso de la autovía (Sistema 3) no fue posible seguir el proceso de principio a fin: destocoado, acopio y trituración. Para poder tener una idea del coste por operaciones de poner el material pretriturado de tocones en cargadero, se muestran en la *Tabla XLVII* los costes y rendimientos estimados para cada fase.

Máquina	Coste horario (€/h)	Rendimiento (t M.V./h)	Coste unitario (€/t M.V.)	Coste total (€/t M.V.)
SISTEMA 1 Pista forestal				
Retroexcavadora	57,58*	1,07	8,88	55,11
Autocargador	55,39	2,67	20,75	
Pretrituradora y autocargador	199,86	7,85	25,48	
SISTEMA 2 Chopera				
Retroexcavadora	84,34	11,29	7,47	39,74
Pala cargadora	66,62	18,13	3,67	
Pretrituradora	144,47	5,7	28,60	
Cargadora "Manitou"	18,53**			
SISTEMA 3 Autovía				
Autocargador	55,39	6,99	7,92	21,39
Pretrituradora	144,47	15,32	13,47	

* Se imputa el 15% del coste horario de la retroexcavadora al triturado puesto que es el porcentaje de tiempo de trabajo que corresponde a esta operación. ** En el coste horario de esta máquina no está incluida la mano de obra puesto que un único operario lleva la pala y dirige la pretrituradora.

	Maquinaria	Rendimiento (t M.V./hora)	Coste unitario (€/t M.V.)
Destocoado	Retroexcavadora S1	1,07	8,88
	Retroexcavadora S2	11,29	7,47
Acopio	Autocargador S1	2,67	20,75
	Autocargador S3	6,99	7,92
	Pala cargadora	18,13	3,67
Pretriturado	Pretrituradora + Autocargador S1	7,85	25,48
	Pretrituradora + "Manitou" S2	5,7	28,6
	Pretrituradora + Autocargador S3	15,32	13,47

Tabla XLVI: Resumen de rendimientos y costes de las experiencias estudiadas.

En los sistemas 1 y 2, se siguió todo el proceso; destocoado, acopio y pretriturado. **El coste del pretriturado en cargadero es de 55,11 y 39,74 €/t M.V. al 25 % de humedad.**

El sistema 1 tenía importantes limitaciones debidas a la distribución dispersa y lineal de los tocones en la pista, y a su gran tamaño. El sistema 2 tenía algunas carencias como el sistema de alimentación, ya que el brazo telescópico de la pala cargadora (*Manitou*) es muy lento para la alimentación de la máquina. Además, el gran volumen de algunos tocones disminuía también en este caso el rendimiento.

- En los costes resultantes **no están incluidos el transporte, el beneficio industrial ni los costes indirectos y de estructura.**
- Los costes de transporte en función de la distancia a planta o centro logístico aparecen detallados en la *Tabla XLVIII*. Para el cálculo se ha supuesto que se carga en un camión de piso móvil de 90 estéreos de capacidad con 25 toneladas de materia verde (t M.V.) de capacidad de carga.

Distancia km	25	50	100	200	300
Coste transporte (€/t M.V.)	6,74	7,68	9,55	13,30	17,05

Tabla XLVIII: Costes de transporte en función de la distancia.

Con estos datos se puede tener una referencia aproximada del coste de elaboración y transporte de una tonelada de tocones triturados puesta en el centro de consumo.

El rendimiento del autocargador en el Sistema 3 estuvo fuertemente influenciado por el hecho de que los tocones se encontraban previamente agrupados en grandes montones, por lo que la máquina no tenía que ir desplazándose de un lugar a otro durante la carga, operación que sería necesaria en un caso real, y cuyo coste no ha sido computado en el presente caso, al encontrarse los tocones ya acopiados cuando se comenzaron las mediciones.

Para hacer una hipótesis de cálculo del rendimiento del autocargador teniéndose que desplazar entre pequeños montones de tocones, se puede emplear el tiempo de carga medio del Sistema 1, donde el autocargador se desplazaba de un montón a otro durante el ciclo. **El rendimiento bajo esa hipótesis resulta de 5,04 t M.V. / hora, y el coste unitario correspondiente de 10,99 €/t M.V.**

Si se supone que, tras el destocoado en una chopera con retroexcavadora, se produjese el acopio de tocones con autocargador (con una distancia media de desembosque de 250 m), el pretriturado en el cargadero alimentando a la pretrituradora con el mismo autocargador, y finalmente el transporte del material a una distancia de 100 km, el coste final de la tonelada en verde de biomasa sería el siguiente:

– Costes de elaboración: 7,47 (destocoado) + 10,99 (acopio) + 13,47 (trituración)	31,93 €/t
– Gastos indirectos y de estructura (15 %)	4,79 €/t
– Beneficio industrial (12%)	3,83 €/t
– Costes de transporte	9,55 €/t
TOTAL	50,10 €/t

Según la propia empresa ejecutora (Macicior, 2007), el reparto de los costes de elaboración para un material que se encuentre bastante seco es el siguiente; **extracción y acopio de entre 5-15 €/t y triturado entre 12 y 15 €/t, unos 30 €/t puesta en cargadero, coste coincidente de forma aproximada con las estimaciones del estudio sin considerar costes indirectos ni beneficios.**

- En esta operación, el **coste de transporte** supone hasta un **20 % del coste total**. En otras experiencias llevadas a cabo en Italia los costes de destocoado y acopio varían entre 28 y 66 €/t y el transporte es la operación más costosa, puesto que transportan los tocones sin triturar, lo que supone hasta el 40 % del coste total (Spinelli, *et al.*, 2005).

8. 9. Conclusiones

8.9.1. Respecto al recurso a los tocones como fuente de biomasa forestal para uso energético:

- **En España, todavía no está implantado el aprovechamiento del tocón con fines energéticos, salvo en algunos eucaliptares del suroeste.** Sin embargo, en otros países del norte de Europa como Finlandia y Suecia el aprovechamiento de este recurso está muy extendido en las cortas finales de pino y abeto (Kalliota y Markilla, 2004).
- El aprovechamiento del tocón en España es un **recurso potencial en cortas finales de especies como el pino, el chopo y el eucalipto, y en otros trabajos en los que sea necesario la extracción del tocón**, como la construcción de carreteras y otras infraestructuras.
- El **sistema radical** representa entre un **20 y un 25 % de la biomasa total del árbol**, y en muchas ocasiones tiene un mayor “contenido energético” que el fuste. La biomasa en cortas finales puede suponer, como media, 50 t/ha para el chopo y 35-40 t/ha para el pino.
- El uso de la biomasa radical supone el uso de un material residual al que de momento no es necesario aplicar ningún tipo de coste por la materia prima, y además, **la extracción del tocón puede resultar beneficiosa de cara a la preparación del suelo para la regeneración tras cortas finales, y para evitar la transmisión de enfermedades fúngicas** (Spinelli, *et al.*, 2005).
- En el **sistema de trabajo** generalizado en los países nórdicos, el tocón se extrae con retroexcavadora con un cabezal adaptado al trabajo de extracción tocones, se acopian con un autocargador de gran capacidad en un cargadero y antes de ser transportados, se dejan en cargadero durante unos meses para que con la lluvia pierdan parte de la tierra y las piedras.
- **En Finlandia, los tocones se transportan sin triturar en el 80 % de los aprovechamientos**, puesto que el triturado en planta permite un tratamiento del tocón más exhaustivo de cara a eliminar las impurezas, que son un factor importantísimo y limitante en este tipo de material.

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos

- En España, en las experiencias de este tipo que se han analizado, el triturado se hacía en monte con una pretrituradora y después se cargaba el pretriturado en camiones para trasladarlo a la central logística o directamente a planta, donde se limpiaba de tierra y piedras mediante cribado y se trituraba (o se astillaba) de nuevo para conseguir un combustible que ya pudiera introducirse directamente en las calderas.

8.9.2. Respecto a la planificación previa:

- **La opción del transporte del tocón sin triturar es preferible, puesto que su tratamiento en planta se puede hacer con un rendimiento mucho mayor**, ya que las operaciones de pretriturado, cribado y un triturado o astillado posterior se pueden hacer en cadena, lo cual compensa el coste extra de transportar tocones enteros en vez de triturados.
- **Si, a pesar de ello, se opta por el procesado en campo de tocones, la tecnología más adecuada es la pretrituradora** lenta, puesto que es un material que contiene gran cantidad de tierra y piedras.
- **El acceso a los montes puede paralizar un trabajo forestal. Se debe tener en cuenta el firme de las pistas, su anchura, la pendiente y los radios de giro, así como la presencia de puentes u otros obstáculos que supongan limitaciones de gálibo.** En montes con dificultad de acceso –casi todos–, los camiones deben ser apropiados para circular por caminos forestales.
- **La opción más adecuada para el transporte son los camiones semi-remolques de piso móvil** que tienen una capacidad de hasta 90 estéreos, en lugares de fácil acceso. En montes con peores condiciones de acceso se optará por camiones rígidos que tienen una menor capacidad en cuanto al volumen de transporte (55 estéreos), pero tienen mayor posibilidad de desplazarse en montes de peores condiciones.
- Para el acopio de los tocones, ya sea para triturarlos en campo o para cargarlos en camiones directamente, **el cargadero se debe situar en un lugar de buena capacidad portante donde puedan acceder camiones de tracción ordinaria.**
- La superficie necesaria en cargadero si no se apilan los tocones en altura es de **4-4,5 m² por tocón** en choperas con un diámetro normal medio de 35 cm. Por ejemplo en una chopera con un marco de plantación 5x5, con 400 pies/ha y diámetro medio de 35 cm, se necesita **0,16 ha de pila por hectárea de chopera**. En caso de tener un sistema de acopio y de alimentación de la trituradora que permita acopiar en altura, la superficie necesaria puede reducirse en más de un 50%.
- **La superficie necesaria para el pila del producto ya triturado se reduce a 0,65 m² por tocón (3,8 m²/t)** que, para el mismo ejemplo anterior, serán 260 m² de pila/ha.

235

8.9.3. Recomendaciones generales respecto al destocoñado, acopio y trituración de los tocones:

- En todas las fases de ejecución se debe tener muy presente la gran cantidad de tierra y piedras que acompañan a los tocones. **En cada operación de manipulación del tocón, un buen manejo de este (sacudiéndolo y volteándolo) favorecerá el desprendimiento de estas impurezas que hacen que disminuya el valor del producto.**

- **Otro factor que favorece la limpieza del tocón es dejarlo secar entre operación y operación.**
- **El destocoñado se lleva a cabo con retroexcavadora. Estas máquinas deben tener una potencia superior a 100 kW (136 CV).** El elevado coste horario de las máquinas de mayor potencia se compensa por el aumento que se experimenta en el rendimiento.
- **El uso de una pinza adaptada para extraer los tocones y, en su caso, romperlos (o el cizallado posterior a la extracción y a un primer secado), produce importantes mejoras en el rendimiento de la alimentación para su pretriturado.** Además, **favorece que se extraigan con menor cantidad de tierra.** Estos aperos cuentan con cizallas que pueden cortar el tocón en varios trozos al tiempo que lo extraen del terreno o al cabo de un cierto periodo de secado. El hecho de partir el tocón es interesante porque facilita su manejo, apilado y alimentación en pretrituradoras lentas, además de favorecer el desprendimiento de piedras y arena.
- En los estudios llevados a cabo, en el **Sistema 1**, la retroexcavadora extraía tocones y además iba abriendo la pista. **El rendimiento en apertura de pista con destocoñado en este caso fue de tan sólo 15 tocones por hora. El tiempo adicional en el trabajo de apertura de pistas, por el hecho de manejar los tocones y apilarlos (ya que se destocoñaría en cualquier caso), fue del 15 %.** Por lo tanto, a la hora de estimar el coste de esta operación que repercute en el material triturado puesto en cargadero solo habría que imputarle el 15 % del coste horario de la retroexcavadora.
- En el **Sistema 2**, en el que la única labor de la retroexcavadora era destocoñar, **el rendimiento fue de 67 tocones por hora.** En experiencias realizadas en Italia **con un cabezal adaptado a este tipo de trabajos, se obtienen producciones mucho más altas, de hasta 150 tocones/hora** (Spinelli, *et al.*, 2005).
- **En el acopio de los tocones, la máquina más apropiada es el autocargador frente a la pala cargadora.** El rendimiento de la pala cargadora es mucho mayor pero se arrastra gran cantidad de tierra con los tocones, que es precisamente lo que hay que evitar.
- **El rendimiento del autocargador sobre tiempo productivo es más del doble en la autovía que en la pista forestal (7,33 en el sistema 3 frente a 3,04 t/hora en el sistema 1).** La causa principal de esta diferencia en el rendimiento es la distancia media de desembosque de uno y otro sistema (95 m en el sistema 3 frente a 250 en el sistema 1).
- **Los factores con mayor importancia sobre el rendimiento de acopio son la distancia de desembosque y la capacidad de carga de la caja del autocargador.**
- Las **pinzas** utilizadas para cargar los tocones deben tener **una elevada capacidad** puesto que los tocones pueden ser muy voluminosos. La utilización de **pinzas tipo pulpo** es recomendable para este material.
- Se deben **utilizar grúas de largo alcance** que permitan la carga y apilado de tocones sin cambiar de posición.
- La **caja del autocargador** debe poseer una elevada **capacidad** de carga en volumen y para evitar que los tocones caigan de la caja, se puede **disminuir la distancia entre los teleros o equipar la caja con paneles metálicos laterales, incluso compresores.**

El aprovechamiento de tocones como biomasa para usos energéticos

- Al descargar los tocones, si se van a cargar directamente en camiones sin elaborar se puede hacer un apilado en altura, y si se van a triturar en el campo, la altura de la pila no debe ser tal que dificulte el trabajo de la máquina que vaya a alimentar a la pretrituradora.
- En la trituración de los tocones, el rendimiento medio en el **Sistema 1** fue de **7,85 t/hora**, en el **Sistema 2** fue de **6,91 t/hora (40,91 tocones/hora)** y en el **Sistema 3** fue de **15,13 t/hora (85,23 tocones/hora)**. Estas diferencias tan grandes en el rendimiento, tratándose de la misma máquina, se deben sobre todo al sistema de alimentación en uno y otro caso y **sobre todo, al volumen de los tocones, que no habían sido cortados y tenían grandes tamaños en los Sistemas 1 y 2.**
- **Para la alimentación, el empleo del autocargador es mejor que el de la cargadora telescópica**, puesto que la grúa tiene una mayor movilidad y alcance, de manera que se minimiza el desplazamiento del cuerpo de esta máquina.

8.9.4. Recomendaciones respecto a los aspectos medioambientales:

- **En los casos analizados, la extracción de tocones favorece la regeneración tras una corta a hecho además de evitar una posible fuente de transmisión de enfermedades.**
- Para evitar la pérdida de fertilidad del suelo debido a una extracción de nutrientes excesiva, se recomienda no intentar extraer todo el sistema radical, dejando que permanezcan en el suelo las raíces secundarias con un diámetro menor de 5 cm.
- Aunque el caso de las choperas no suele ser problemático, tanto en éstas como en otras cortas a hecho seguidas de regeneración, se debe valorar la necesidad de fertilizar, especialmente en suelos ácidos y muy ácidos.

8.9.5. Recomendaciones respecto a la seguridad y salud:

- Los operarios deben conocer las normas de seguridad y salud concernientes a su puesto de trabajo para garantizar la seguridad y salud y respetarlas. Además deben utilizar siempre y correctamente los E.P.I.s preceptivos.

8.9.6.- Recomendaciones respecto a la calidad de la astilla:

- La biomasa de la parte subterránea del árbol **contiene una densidad energética mayor que la parte aérea (Spinelli, et al., 2005), pero el alto contenido en cenizas (hasta un 24 % para el abeto)** disminuye la calidad de este material como combustible (Laitila, et al., 2006).

8.9.7. Recomendaciones en cuanto a los costes de aprovechamiento:

- En las experiencias estudiadas, **el coste del triturado en cargadero en el Sistema 1 es de más de 55 €/t verde (al 25% de humedad), y en el Sistema 2 es de 39,74 €/t materia verde al 25 % de humedad.** A estos costes falta añadirles los costes fijos

de explotación, los costes generales de estructura, el beneficio industrial y el coste del transporte.

- Los sistemas estudiados presentaban muchas carencias debido a que no fue posible una planificación adecuada ni el uso de maquinaria específica, especialmente para extraer los tocones. **En unas condiciones normales, el coste de elaboración se estima en 31,93 €/t** . Añadiéndole los gastos indirectos y el beneficio industrial y el coste del transporte, el coste de la tonelada de triturado puesta en planta es de **50,10 €/t**.
- En esta operación, el **coste de transporte** supone hasta un **20 % del coste total**, para una distancia de 100 km. Para distancias mayores, los costes de transporte pueden hacer que este tipo de aprovechamiento resulte inviable.

EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL EN LAS CORTAS A HECHO DE PINARES DE PINO SILVESTRE Y RESINERO

9.1. Fases de los trabajos, equipos y secuencia de las operaciones

Las cortas a hecho suponen una intervención selvícola que se realiza al final de un turno de ordenación, y cuya función es retirar la masa arbórea madura para permitir el desarrollo del regenerado. Donde el carácter de la especie y otras consideraciones técnicas y sociales permiten la aplicación de este tratamiento, estas cortas suelen conllevar un aprovechamiento menos costoso que las cortas parciales, como las llamadas “entresacas” (clareos y claras) o las cortas selectivas de regeneración conocidas como por “aclareo sucesivo” o las cortas sanitarias o “de policía”.

Se han estudiado una serie de cortas a hecho sobre masas de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait. en montes de Soria, entre septiembre de 2006 y febrero de 2008. Las experiencias fueron coordinadas y financiadas por la Fundación CESEFOR, con el apoyo de los gestores de la Administración Forestal de la Junta de Castilla y León.

9.1.1. Descripción del aprovechamiento de madera en Muriel Viejo (Soria)

Se trató de una corta final “a hecho” de pino resinero con apeo con motosierra, procesado mecanizado con cosechadora, y desembosque con autocargador forestal.

La corta afectó a varias parcelas de los montes “Comunero de Arriba” y “Comunero de Abajo”, pertenecientes al T.M. de Muriel Viejo, en septiembre y octubre de 2006, totalizando una superficie de 9,4 ha. Los montes presentaban pendientes moderadas (hasta un 30%), con 350 pies/ha, de ramosidad abundante, que produjeron 274 metros cúbicos de madera con corteza y 41 toneladas de biomasa verde por hectárea. La empresa ejecutora fue “Recoleciones Forestales S.A.”.

El apeo se realizaba con motosierra, procurando que los pies quedasen siguiendo curvas de nivel. El desramado y tronzado, en trozas de diferente longitud según destinos, era mecanizado, con cosechadora forestal o “procesadora” *Ponsse Ergo*, lo que permitía depositar los restos en cordones paralelos a los de la madera, dejando entre medias una “calle” libre para el desembosque con autocargador con el fin de evitar que las máquinas transitaran sobre la biomasa, contaminándola con arena o barro. Los diámetros en punta delgada estaban entre 7 y 10 cm.

El desembosque se ejecutó con autocargador *Ponsse Buffalo*, con las trozas dispuestas de forma alternativa, longitudinal o transversal, en función de su longitud. En borde de pista, se producía el apilado en espera de la llegada de un camión de transporte a destino.

Estaba prevista la recolección y astillado de las ramas y copas mediante un sistema de astillado móvil, mediante una astilladora *Bruks* montada sobre un autocargador forestal, si bien la avería de esta máquina impidió llevar a cabo esta fase del aprovechamiento, por lo que en este caso no se pueden aportar datos de los rendimientos del astillado y extracción de las astillas.

Las fases de las operaciones controladas por el equipo de la U.P.M. se presentan en las fotografías de las *Figuras 216 a 219*.



Fig. 216: Resultado del apeo con motosierra en Muriel Viejo (Soria).



Fig 217: Procesado mecanizado en Muriel Viejo (Soria).



Fig. 218: Resultado del procesado de madera y biomasa en Muriel Viejo (Soria).



Fig 219: Desembosque de madera con autocargador Muriel Viejo (Soria).

240

Los rendimientos medios obtenidos en esta experiencia para cada fase del aprovechamiento de madera han sido los que se reflejan en la *Tabla IL*:

	Rendimiento sobre Tiempo de trabajo (m ³ /h)	Coste (€/m ³)
Apeo con motosierra.	37,1	0,34
Desramado, tronzado y apilado de madera y biomasa	28,0	2,63
Desembosque	13,2	4,09
	TOTAL COSTE DIRECTO	7,06

Tabla IL: Rendimientos medios del aprovechamiento de madera, apilando biomasa por separado, en Muriel Viejo (Soria).

9.1.2. Descripción del aprovechamiento de madera en Pinar Grande (Soria)

Se trató de una corta final “a hecho” de pino silvestre, con apeo y elaboración con motosierra y arrastre de fustes enteros con *skidder*. Las fases del aprovechamiento se muestran en las fotografías de las Figuras 220 y 221.

Se cortó una parcela de 8 hectáreas del Monte “Pinar Grande”, situado en el Término Municipal de Navaleno (Soria). La corta afectó a una masa madura de pino silvestre de unos 500 pies/ha de 28 cm de diámetro medio, con ramosidad abundante. La producción por hectárea en volumen de madera fue de 380 m³/ha, mientras que la de biomasa fue de 75,2 t/ha, para un diámetro en punta delgada de unos 12 cm. Las empresas ejecutoras de este aprovechamiento fueron Maderas María en lo que respecta a la madera, y Garnyca Plywood en lo referente al aprovechamiento de biomasa.

El apeo se realizó con motosierra. El motoserrista iba buscando la caída más cómoda para su trabajo, su principal objetivo era que no quedara el árbol enganchado, y como objetivo secundario tenía que cayese en una posición cómoda para el desramado, que también se realizaba manualmente. Es difícil integrar en la cultura de trabajo otros criterios de apeo, no obstante actualmente la Guadería Forestal vigila que no se apeen árboles sobre los cursos de agua, ni alrededor de árboles que alberguen especies protegidas o de interés cuando están en época de cría, ni sobre superficie de monte que esté en regeneración, ni sobre especies arbóreas protegidas como el acebo.



Fig. 220: Apeo con motosierra en Pinar Grande (Soria).



Fig 221: Desembosque con skidder Timberjack en Pinar Grande (Soria).

El desramado era manual y el operario también despuntaba el fuste a un diámetro que variaba según se hubiese partido o no el fuste y su conformación, pero oscilaba, como se ha indicado, en torno a los 12 cm.

La saca se realizaba con *skidder*, que arrastraba los fustes enteros hasta cargadero. En su desplazamiento podía arrastrar varios fustes. En esta operación el *skidder* circulaba sobre los restos de corta, fraccionándolos y mezclándolos con tierra y piedras. Circular sobre los residuos amortigua el impacto del paso de maquinaria sobre el terreno, pero dificulta el posible aprovechamiento de biomasa.

En cargadero, llegaba un camión *trailer* que transportaba los fustes enteros a fábrica, donde se descortezaban y tronaban.

Los rendimientos medios obtenidos en esta experiencia de Pinar Grande fueron los siguientes (*Tabla L*):

	T. trabajo (m ³ /h)	T. productivo (m ³ /h)	Coste (€/m ³)
Apeo y desramado	7,2	9,6	2,9
Saca (Timberjack 100 CV)	6,2	8,7	7,2
Saca (Timberjack 160 CV)	11,4	17,4	3,9
TOTAL COSTES DIRECTOS			6,8

Tabla L: Costes del aprovechamiento maderero con skidder y motosierra en Pinar Grande.

9.1.3. Descripción del aprovechamiento de madera en Quintana Redonda (Soria)

Era también una corta final “a hecho”, en este caso de pino resinero, con apeo y procesado mecanizados con cosechadora y desembosque con autocargador forestal, cuyas fases y maquinaria empleada para las mismas se ilustra mediante las *Figuras 222 y 223*.

Se cortó una parcela de 4 hectáreas, correspondiente a una masa madura de pino resinero de 535 pies/ha de 30 cm de diámetro medio, con ramosidad media a abundante. La producción por hectárea en volumen de madera fue de 295 m³/ha, mientras que la de biomasa fue de 64 t/ha (en verde), para un diámetro en punta delgada de entre 7 y 10 cm. La empresa ejecutora de este aprovechamiento fue Recolecciones Forestales S.A. en lo que respecta a la madera, y Maderas Rubial en lo referente al aprovechamiento de biomasa.

En algunas cortas a hecho de pinares se emplean cosechadoras forestales o “procesadoras” para el apeo, desramado y tronzado. Estas cosechadoras pueden estar acompañadas por un motoserista auxiliar que apea previamente los árboles de mayor diámetro principalmente o puede realizar la operación de apeo de todos los pies, tanto para evitar que la cadena de la procesadora se ponga en contacto con partículas del suelo que deterioren el útil de corte, optimizando así el rendimiento de la máquina mediante la reducción del tiempo de afilado o cambio de cadena, como para ganar productividad en el trabajo de la cosechadora, a la que se evitan los tiempos de aproximación y posicionamiento del cabezal en el árbol. La ganancia en costes se debe a que el apeo –sin elaboración– con motosierra es una operación altamente productiva.

242

En la experiencia que se describe, la procesadora desramaba salvo que las ramas fueran de más de 15 cm de diámetro en la base de inserción, caso en que lo hacía el motoserista. La cosechadora también tronzaba, separando las trozas según destino: madera de sierra (de más de 24 cm de diámetro), madera para palet (entre 16 y 20), madera para trituración (entre 7 y 14) y meleras (troza basal del pino resinado), cuando las había.

El autocargador sacaba la madera en corto a cargadero a pie de pista. En el apilado en cargadero, se mantenía la separación realizada por la procesadora, y el autocargador formaba una pila para cada destino.

Hasta la pista llegaban los camiones *trailer*, cada uno tenía un destino distinto y transportaba las trozas a la correspondiente fábrica. En la *Tabla LI* se presentan los rendimientos y costes medios

	T. trabajo (m ³ /h)	T. productivo (m ³ /h)	Coste (€/m ³)
Apeo, desramado, tronzado	9,6	15,2	7,8
Saca	14,2	17,3	4,3
TOTAL COSTES DIRECTOS			12,1

Tabla LI: Rendimientos y costes medios del aprovechamiento maderero mecanizado.

9.1.4. Comparación de los sistemas de corta manual y mecanizado

- El sistema de corta manual es menos agresivo para el monte: menos residuos de gasolina y aceite, menos compactación, menos ruido, menos emisiones de gases contaminantes.
- El sistema de corta mecanizada supone un trabajo más ergonómico y seguro para los trabajadores.
- La productividad de la fase de apeo y desramado es un 19 % mayor en el sistema mecanizado. Sin embargo, un motoserrista es un 65 % más barato.
- El aprovechamiento mecanizado aumenta la cantidad y la calidad del posible aprovechamiento de biomasa integrado con el de madera, resultando a menudo la clave para que el primero resulte técnica y económicamente viable.



Figura 222: Cosechadora (o “procesadora”) Ponsse en Quintana Redonda (Soria).



Figura 223: Autocargador Timberjack en Quintana Redonda (Soria).

9.1.5. Orientaciones para incorporar el aprovechamiento de biomasa

9.1.5.1. Esquemas de trabajo

En la Figura 224 se presentan de forma esquemática los sistemas que se han estudiado en lo que respecta al aprovechamiento de biomasa forestal, en las experiencias en que éste se pudo llevar a cabo, es decir, en los montes de Quintana Redonda y Pinar Grande.

En Quintana Redonda se hizo un aprovechamiento mecanizado, y tal y como se expone en la citada Figura, se experimentaron dos sistemas de trabajo con variantes, a saber:

- **Sistema 1: Aprovechamiento de biomasa integrado con la corta de madera, seguido de astillado fijo.**- Astillado en cargadero de la biomasa. Esta biomasa había

sido sacada por el autocargador, y previamente acordonada en monte por la procesadora, de forma integrada con el aprovechamiento de madera (es decir, la procesadora tuvo en cuenta, al procesar los pies, que después se aprovecharía la biomasa).

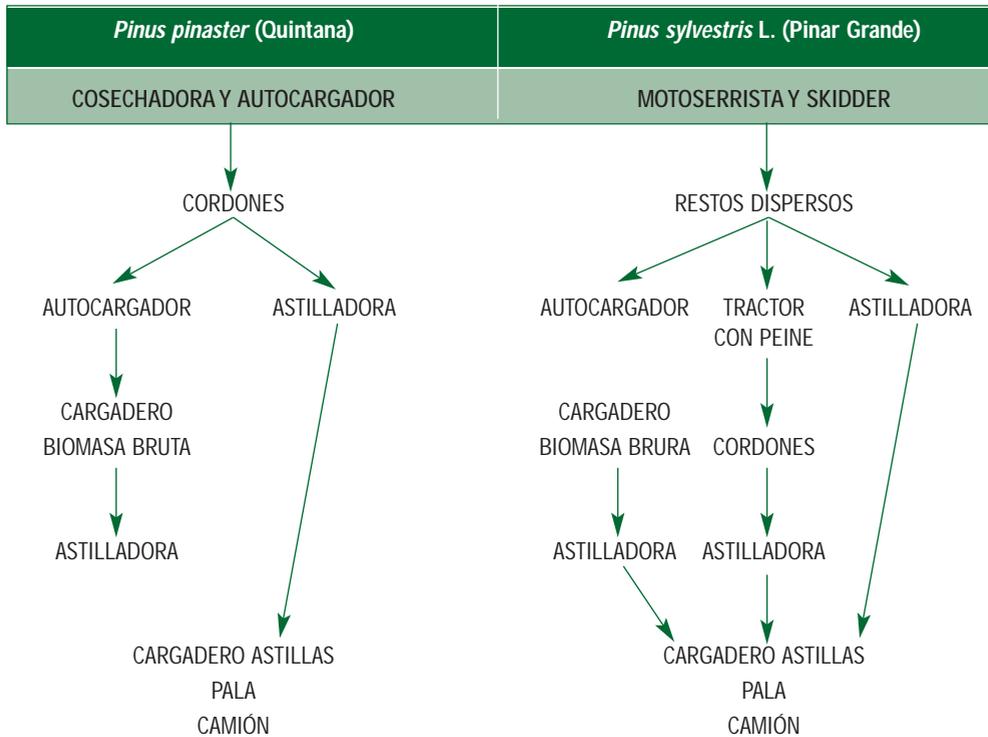


Figura 224: Esquemas de trabajo de aprovechamiento de biomasa en cortas a hecho ensayados en Castilla y León.

- **Sistema 2a: Aprovechamiento de biomasa integrado con la corta de madera, seguido de astillado móvil.**- Astillado móvil sobre cordones. La astilladora montada sobre autocargador se desplazaba por el monte, recolectando y astillando la biomasa previamente acordonada por la procesadora, también de forma integrada con el aprovechamiento de madera. La saca del material procesado también lo ejecutó la astilladora, por medio del contenedor que porta. Esta astilla se descargó junto a la pista.
- **Sistema 2b: Aprovechamiento de biomasa no integrado con la corta de madera, seguido de astillado móvil.**- Una variante de este sistema de trabajo fue el astillado y saca de material no acordonado, en que se pretendían reproducir las condiciones de una corta en que, durante el aprovechamiento de madera, no se hubiera tenido en cuenta que la biomasa sería posteriormente extraída, y por tanto no se hubiese acordonado por la cosechadora.

En Pinar Grande, el aprovechamiento de biomasa fue posterior a un aprovechamiento

de madera con motoserrietas y saca con *skidder*, y no estaba integrado con el de madera (es decir, que la empresa que ejecutó el aprovechamiento no cambió su sistema de trabajo para favorecer el posterior aprovechamiento de la biomasa). En este aprovechamiento se desarrollaron los siguientes esquemas de trabajo:

- **Sistema 3a: Aprovechamiento de biomasa no integrado con la corta de madera, seguido de astillado fijo.**- Astillado en cargadero después de la saca con autocargador de biomasa bruta acordonada *a posteriori* (tras una corta en que no se hubiese tenido en cuenta el posterior aprovechamiento de la biomasa), por medio de un pequeño tractor equipado con un peine.
- **Sistema 3b:** Una variante del sistema anterior fue el desembosque con autocargador de la biomasa dispersa, sin acordonarla con tractor.
- **Sistema 4a: Aprovechamiento de biomasa no integrado con la corta de madera, seguido de astillado móvil.** Astillado móvil sobre material acordonado *a posteriori* (tras una corta en que no se hubiese tenido en cuenta el posterior aprovechamiento de la biomasa), por medio de un pequeño tractor equipado con un peine, y saca de la astilla a cargadero con el contenedor de la astilladora móvil.
- **Sistema 4b:** Una variante del sistema anterior fue el astillado de material disperso, sin acordonado con tractor, seguido también de la saca de astillas por la astilladora móvil.

9. 2. Evaluación del recurso: Significación selvícola, importancia y localización en Castilla y León. Tabla de diámetros – Pesos de biomasa

Las masas de *Pinus sylvestris* L. ocupan en Castilla y León 356.000 ha de las que 194.000 son masas naturales. Supone esta especie el 18 % de las masas forestal arbolada. Según el 3^{er} Inventario Forestal Nacional, estas masas suponen casi 41 millones de metros cúbicos de madera, con un crecimiento anual de casi dos millones. La extracción de madera se ha mantenido constante en los primeros años del siglo XXI en torno a los 400.000 m³ con corteza, con tendencia creciente. Por otro lado, según el 3^{er} IFN el *Pinus pinaster* Ait. ha alcanzado los 39 millones de m³ con corteza y 412.000 ha arboladas. El aprovechamiento maderero de esta especie también está próximos a los 400.000 m³, cifra menor que su crecimiento anual, que es de casi 900.000 m³.

9.2.1. Curva "peso de biomasa - Diámetro normal"

Como se aprecia en la *Figura 225*, en las experiencias estudiadas el *Pinus sylvestris* L. tiene algo más de biomasa verde por pie a igualdad de diámetro, que el *Pinus pinaster* Ait., y esto se mantiene si se habla de peso seco. La biomasa para los dos montes estudiados de *P. pinaster* Ait. en los municipios de Muriel Viejo y Quintana Redonda tiene una relación similar con el diámetro normal. En los tres casos, esta biomasa no incluyó el fuste hasta 7 cm en punta delgada, que tuvo un aprovechamiento maderero. Estas ecuaciones se aplicaron sobre las distribuciones diamétricas para obtener la cantidad de biomasa por clase diamétrica y por hectárea.

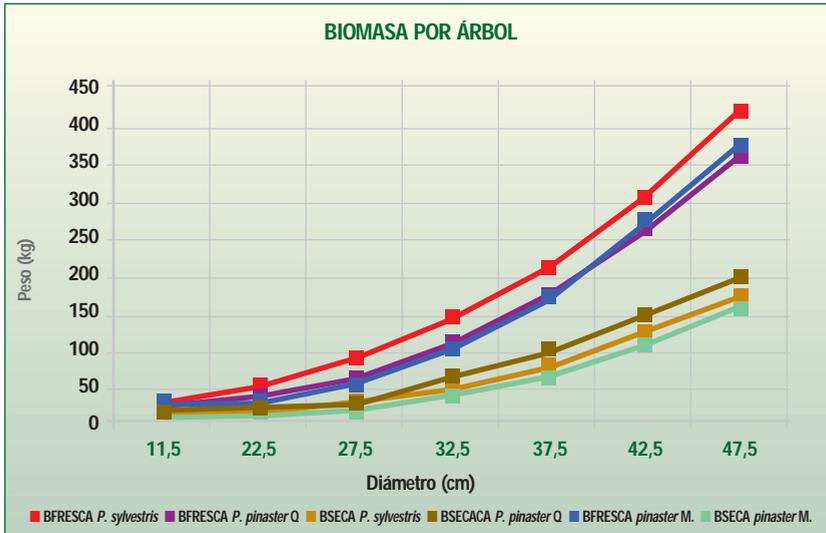


Figura 225: Gráfica de la biomasa (sin fuste) en las especies *Pinus sylvestris* L. (en Pinar Grande), *P. pinaster* Ait. (Muriel Viejo) y *P. pinaster* Ait. (Quintana Redonda).

9.3. Breve descripción de las experiencias de aprovechamiento de biomasa estudiadas

Las experiencias de aprovechamiento de biomasa (es decir, excluyendo la de Muriel Viejo) sobre las que se llevaron a cabo las experiencias se describen concisamente a continuación:

- La primera correspondió con un lote de *Pinus sylvestris* L. de Pinar Grande, Monte de Utilidad Pública perteneciente al Ayuntamiento de Soria y la Mancomunidad de los 150 Pueblos, con una superficie de 8 ha que pertenece al monte ordenado y se encontraba dentro del tramo de regeneración. Este monte estaba a punto de cumplir un turno completo de ordenación. Bajo el estrato de pies maduros se encontraban algunos golpes de regenerado. No había apenas matorral y la pedregosidad también era baja.
- La otra experiencia fue sobre un monte de Utilidad Pública poblado por *Pinus pinaster* Ait. en Quintana Redonda (Soria), propiedad del Ayuntamiento, con una superficie de aproximadamente 4 ha. Este monte había sido resinado, por tanto existían pies que mantenían en la base del fuste las cicatrices y en ocasiones las grapas de las picas practicadas. Bajo el estrato dominante de pino existían rodales de *Quercus pyrenaica* Willd. de pies alargados, con altura en torno a los 2,5 m, muy poco ramificados y con diámetros inferiores a los 10 cm.

Ambos montes fueron inventariados para conocer las características dasométricas y también se aparearon pies y pesaron (separando la biomasa entre las fracciones de fuste, ramas gruesas, ramas finas y acículas) para ajustar una tabla de pesos de biomasa.

9.3.1. Distribución de la biomasa por clases diamétricas y entre las distintas partes del árbol

Las masas estudiadas son masas maduras que han llegado al turno final. La distribución diamétrica es la mostrada en las Figuras 226 a 231. En ambos casos, junto con los árboles dominantes emerge un regenerado agrupado en rodales dispersos, que es más acentuado en el caso del *Pinus sylvestris* L.

Los datos medios de los rodales son los que se muestran en la Tabla LII.

	<i>Pinus pinaster</i> Ait. (Quintana Redonda)	<i>Pinus sylvestris</i> L. (Pinar Grande)
Densidad de pies (pies /ha)	535	499
Diámetro medio (cm)	29,7	27,9
Altura dominante (m)	17,7	21
Proporción peso biomasa/fuste	22%	26%
Proporción kg biomasa/mc	162	167
biomasa (t/ha)	64,1	75,2

Tabla LII: Características dasométricas de las experiencias.

La densidad de pies era mayor en Quintana Redonda, y también el diámetro medio, no así la altura dominante. El *Pinus sylvestris* L. exhibía mayor envergadura, además, el número de pies de diámetro mayor a 37,5 era mayor en el caso del silvestre.

En la cantidad de biomasa fresca en kg por metro cúbico con corteza, las dos experiencias mostraron valores muy parecidos; sin embargo, el *Pinus sylvestris* L. tenía más biomasa por unidad de superficie. Esta cantidad de biomasa por m³ (de madera) aumenta conforme desciende el diámetro medio de la masa.

Los restos que quedaron sin recogerse después del aprovechamiento en el caso del *Pinus pinaster* Ait. mecanizado fueron 8 t/ha (Sistemas 1 y 2), y en el caso de apeo manual y skidder del *Pinus sylvestris* L. fueron 11 t/ha donde el autocargador sacó los res-

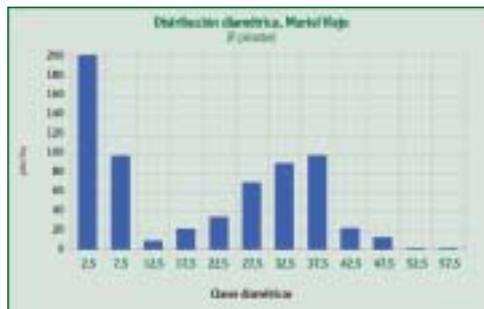


Figura 226: Distribución diamétrica de la masa de *Pinus pinaster* Ait. en Muriel Viejo (Soria).

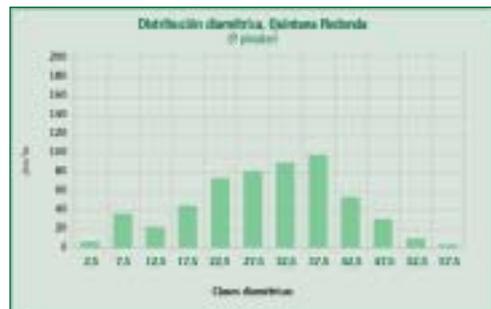


Figura 227: Distribución diamétrica de la masa de *Pinus pinaster* Ait. en Quintana Redonda (Soria).

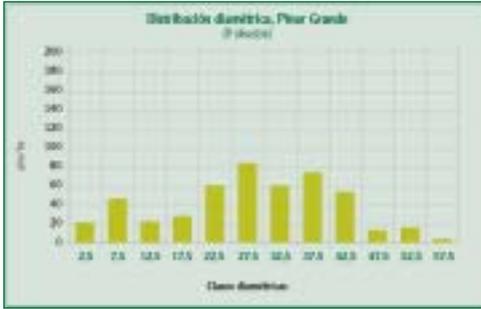


Figura 228: Distribución diamétrica de la masa de *Pinus sylvestris* L. en Pinar Grande (Soria).

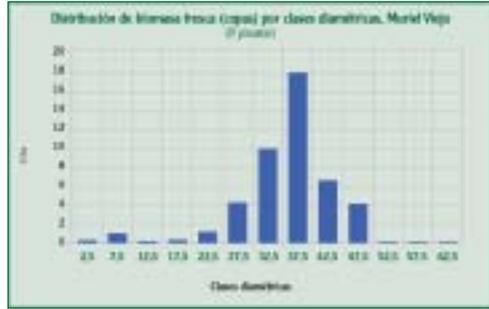


Figura 229: Biomasa (cops) por ha y clase diamétrica en *Pinus pinaster* Ait. en Muriel Viejo (Soria).

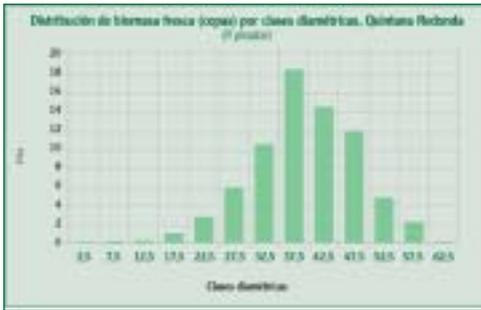


Figura 230: Biomasa (cops) por ha y clase diamétrica en *Pinus pinaster* Ait. en Quintana Redonda (Soria).

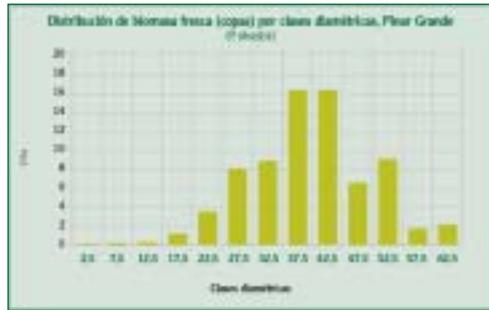


Figura 231: Biomasa (cops) por ha y clase diamétrica en *Pinus sylvestris* L. en Pinar Grande (Soria).



Fig. 233: Aspecto de la masa de *Pinus pinaster* Ait. En Quintana Redonda (Soria).



Fig 234: Aspecto de la masa de *Pinus sylvestris* L. en Pinar Grande (Soria).

tos a cargadero para su astillado fijo (Sistema 3), 19,4 donde se formaron cordones previamente al astillado móvil (Sistema 4 a), y 22 t/ha donde la astilladora trabajó sobre la biomasa tal y como quedó después de la corta (Sistema 4 b).

La proporción peso de biomasa/peso fuste da una idea del aumento de producción de los aprovechamientos forestales. **El uso de la biomasa con fines energéticos puede optar a movilizar en las cortas a hecho alrededor de un 25% más de biomasa.**

9. 4. Consideraciones previas al aprovechamiento de biomasa

9.4.1. Selección del lugar del aprovechamiento

El aprovechamiento de biomasa de restos de cortas a hecho debe considerar la organización del trabajo de asociado a la extracción de madera, es decir, es fundamental la coordinación entre la empresa y los trabajadores que cortan y extraen la madera con los que se encargan de la biomasa. Como en apartados precedentes, son factores clave los siguientes:

- **El tamaño del aprovechamiento.** Los portugueses, aunque frecuentemente trabajen en montes más pequeños por motivos sociales o de oportunidad, estiman en 500 toneladas verdes de astillas el mínimo tamaño para un esquema de saca de restos y astillado fijo (Lagoa, 2005). Teniendo en cuenta los *ratios* de toneladas de biomasa por metro cúbico estimados en los distintos estudios, para obtener esas 500 toneladas serán necesarios más de 1.500 metros cúbicos de madera. Sin embargo, en el aprovechamiento que se realizó en el término municipal de Quintana Redonda (Soria), con 360 t extraídas se obtuvieron unos costes que hacían rentable el aprovechamiento.
- **La carga de biomasa a extraer por hectárea.** De acuerdo con Sydved en Suecia, en 2005, se consideraba rentable actuar por encima de 40 a 50 toneladas verdes de restos por hectárea, para la rentabilidad en extracción de restos de cortas a hecho. En los pinares estudiados, la biomasa a extraer por hectárea está en torno a las 70 t/ha. Si se aceptan las referencias sobre límites de rentabilidad operativa obtenidos en Portugal (500 t), la superficie mínima para rentabilizar un aprovechamiento de este tipo serían de 7 a 8 ha.
- **Pendiente.** Una pendiente por encima del 30 % impediría la mecanización. Pendiente mayores pueden provocar el vuelco lateral de la cosechadora y, especialmente, del autocargador. En terrenos pendientes, se recomienda que sea el maquinista quien trace las calles, bajo el control, en su caso, de los técnicos o agentes de la Administración.
- **Matorral.** El matorral dificulta el trabajo al impedir la visión de la base del tronco. Esto aumenta la posibilidad de colisión del espadín con piedras, cortes poco eficientes que afectan a árboles que deberían quedar en pie, y provoca que los tocones queden más altos. El matorral está en continuo contacto con los latiguillos de la maquinaria provocando rozamiento, enganches y tirones que pueden deteriorarlos. Bajo las masas estudiadas, la capa de matorral era bastante mala.
- **Piedras.** Las piedras suponen un riesgo de colisión para el cabezal, pudiendo dañar los

- elementos de corte. Además pueden desestabilizar la máquina y producir el vuelco.
- **Distancias de desembosque.** Se requiere que las distancias de desembosque no sean excesivas y que haya un lugar con espacio suficiente para cargadero, y que se pueda garantizar que esté en buen estado durante la época de trabajo –es importante evitar el encharcamiento, o tomar medidas paliativas si fuera inevitable, pero teniendo en cuenta la organización y los costes *a priori*–.
 - **Distancia de transporte a la central de suministro.** La distancia de transporte a la central de suministro condicionará la rentabilidad del aprovechamiento, debiéndose seleccionar adecuadamente tanto el método de tratamiento de la biomasa bruta como su forma de transporte. Es tan importante este apartado que se tratará en detalle más adelante.

9.4.2. Planificación previa

Como se ha señalado, una de las primeras decisiones que se deben tomar antes de decidir un aprovechamiento de la biomasa forestal en cualquiera de sus variantes es el esquema general del aprovechamiento en cuanto a la **elaboración que se va a dar a la biomasa** antes de entregarla al demandante, lo que dependerá de las capacidades y especificaciones que este demandante imponga.

Si ese consumidor admite biomasa sin elaborar o existe posibilidad de elaborarla en un centro logístico, la decisión sobre **si procesar o no la biomasa en monte** o cargadero es una cuestión de distancia de transporte, con el principio de que, dado que la preparación de la biomasa –astillado, limpieza, etc.– es siempre más eficaz y barata en destino, la mayor ventaja de su procesado en origen es la reducción de los costes de transporte. Así pues, tiene interés estudiar la dependencia entre las distancias de transporte y los costes conjuntos de preparación y transporte, que se describe con más detalle en el apartado 9.6 (Elección de medio de transporte),

La segunda importante decisión es, en caso de optarse por el procesado “in situ” de la biomasa, la elección de la **forma de ese procesado**, esto es, de si se va a pretriturar –con máquina de tornillo o tornillos lentos–, triturar –con máquinas rotativas de martillos o dientes– o astillar –con cuchillas, generalmente montadas sobre un tambor rotatorio–, la biomasa. Hay que observar que el valor añadido del material es máximo en el astillado –menor granulometría, mayor homogeneidad...– y mínimo en el pretriturado –grandes tamaños de partícula, menos homogeneidad–, por lo que sólo se elige esta opción cuando no se tiene más remedio, esto es, para el caso de abundancia de piedras, elementos metálicos u otras impurezas en el material a triturar. En el caso de extracción de restos de cortas a hecho con autocargador, se puede conseguir una buena limpieza del material, por lo que la opción preferible sería el astillado, en términos generales.

En el caso de los aprovechamientos con apeo manual y saca con *skidder*, el material puede encontrarse muy fracturado y mezclado con tierra y piedras, lo que incrementaría el coste del astillado. Es la empresa de aprovechamientos la que debe evaluar el estado del material y optar, si lo cree rentable, por un triturado por la impureza del material pero, *a priori*, este sistema de aprovechamiento puede no ser compatible con el astillado de la biomasa.

Si, por el contrario, el aprovechamiento maderero es totalmente mecanizado, procesadora y autocargador, el planteamiento para el aprovechamiento de biomasa pasa por la formación de cordones de ramas y puntas por la cosechadora. Una vez formados los cordones en el monte, las posibilidades son la saca de restos con autocargador a cargadero y posterior astillado o la entrada de astilladora móvil al monte y astillado sobre cordón, o como última opción, el transporte de material sin procesar a un centro de procesamiento fijo.

Todas estas consideraciones conducen a **valorar como imprescindible la integración de las cadenas de suministro de biomasa en las de madera**, lo que conduce a una reducción de los costes administrativos y de gestión si se usan herramientas de manejo, sistemas de aprovisionamiento y de información ya existentes. Si la cadena de suministro de biomasa forestal a partir de residuos es independiente de la madera, los costes administrativos y de gestión en los países nórdicos ascenderían a un 8-10%, lo que supone entre 1,0 y 1,5 US\$/m³ sólido, que puede reducirse a sólo 0,5 US\$ si se asignan solamente a la biomasa para energía los costes administrativos marginales “extra” de la actividad principal de aprovisionamiento de madera (Asikainen *et al*, 2002).

Además, la integración de ambas cadenas de suministro da lugar a una mayor facilidad de aplicación de los procedimientos adecuados para la recolección de biomasa en los operarios de la recolección mecanizada de madera.

9.5. Preparación y dimensionamiento de los cargaderos

El acopio de biomasa en cargadero tiene grandes necesidades de espacio. Este condicionamiento debe tenerse en cuenta en la planificación de un aprovechamiento. Pueden generarse muchas pérdidas de tiempo en las operaciones de astillado, descarga, carga y transporte de las astillas.

Las características de los cargaderos son las siguientes:

- Deben tener buena capacidad portante, dado que una astilladora puede llegar a pesar más de 30 t, mientras que un camión de piso móvil puede superar las 40 t en carga. Su superficie debe ser llana y se debe evitar a toda costa la presencia de rocas.
- Los cargaderos deben colocarse en lugares donde puedan acceder camiones con tracción ordinaria. En caso de no existir tales lugares, deberían planificarse los medios para que pudiesen entrar y salir sin dificultad: se puede aportar astillas a la superficie para casos no muy graves o bien añadir grava sobre la misma. Otra opción es planear o aprovechar la presencia de un vehículo auxiliar para cablear los camiones y facilitar su salida (*Figura 235*). Si se producen daños en el cargadero, se debe pensar en los medios para su reparación (*Figura 234*), sobre todo en cunetas y pistas.
- Cuando las condiciones de las pistas puedan ser deslizantes, no conviene situar los cargaderos en la parte baja de una larga cuesta arriba, porque un camión cargado necesita cierto espacio para acelerar antes de afrontar una subida.
- El cargadero debe tener espacio suficiente para la pila –que conviene que sea grande, dotando de flexibilidad al sistema de trabajo– y para que puedan trabajar simultáneamente la astilladora y uno o dos camiones. Para dimensionar el cargadero, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:



Figuras 234 y 235: Problemas operativos de transporte en tiempo lluvioso.

- El cargadero de biomasa (ramas y puntas) dibujaba una planta de forma geométrica bastante similar a un círculo y su aspecto volumétrico podría asemejarse a un cono. La Tabla LIII orienta para dimensionar los cargaderos en función de la cantidad de restos extraídos de un aprovechamiento. Se necesitan alrededor de 3 m² por cada tonelada de material fresco para un cargadero de biomasa ejecutado por un autocargador. Y además por cada tonelada de astilla se necesitarán 0.36 m² en el suelo. **En un aprovechamiento de 500 t serán necesarios 1500 m² para los restos frescos y 180 m² para las astillas, si fuesen a arrojarse al suelo.**

t astilla/m ²	m ³ astilla/m ²
0,36	1,25

Tabla LIII: Densidad de los restos.

- La longitud del cargadero debe ser suficiente. Una astilladora fija sobre camión ocupa desde 10 m a más de 12, un semi-remolque o *trailer* con piso móvil o un camión con remolque de contenedores pueden superar los 18 m. La astilladora móvil utilizada en las experiencias de Pinar Grande y Quintana Redonda tenía 11,5 m de largo, y 2,8 de ancho.
- Las pilas deben disponerse de modo que toda su anchura quede al alcance de la grúa de la astilladora, en ningún caso en la proximidad de líneas eléctricas, y lo más próximas a la pista o carretera.
- En todo caso, las características técnicas de la astilladora determinan a qué lado de la pista o carretera se deben hacer las pilas o si se pueden hacer a ambos lados: De la misma manera, la alimentación de la astilladora debe ser tenida en cuenta, esto es, si carga lateralmente o por la trasera, o si se trata de una trituradora de carga superior. En estos dos últimos casos, la pila o pilas pueden colocarse en ambos lados de la carretera o pista.
- A este respecto, hay que conocer *a priori* el sistema de alimentación y de descarga de la astilladora a emplear (si es lateral, y debe alimentar a un camión situado a su costado, su anchura en operación será de 4 ó 5 metros y necesitará junto con el camión un total de 7 a 8 metros adicionales a los de la propia pila –Kallio y Leinonen, 2005–). Si se trabaja con astilladora sobre chasis de autocargador, puede trabajar desde el otro lado de la pila (en el interior de la masa), aunque no esté habilitado como car-

El aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas a hecho de pinares de pino

gadero –no sea perfectamente llano o tenga escaso poder portante–, lo que reduce las necesidades de espacio. Sin embargo estas astilladoras sobre autocargador descargan basculando lateralmente sobre el camión lo que requiere entonces anchuras de casi 8 m, además de que la astilladora siempre esté en una superficie igual o más alta que la pista donde se sitúe el camión. Otro aspecto a considerar es la altura que se alcanza en la descarga, que puede romper alguna copa de árbol.

- También es conveniente tener en cuenta hacia dónde envía la cañonera de la astilladora o cinta de evacuación de la trituradora el material procesado, si hacia delante, hacia atrás o hacia los lados. Es recomendable que los camiones giren cuando estén vacíos y se coloquen en la dirección del transporte a planta antes de su carga, para evitar maniobras a plena carga (Alakangas *et al*, 1999).
- Se puede reducir la necesidad de espacio cargando con el camión en la pista o carretera. Esto requiere señalar adecuadamente las operaciones, cumpliendo todas las normas de tráfico si se trata de una vía pública, y suficientemente en el caso de una pista particular o que se pueda cerrar, debiendo informar a los potenciales usuarios y señalar a distancia y con claridad suficiente de las operaciones de carga en cualquier caso.

Si el astillado es móvil, la necesidad de cargadero sólo sería para la descarga y almacenamiento temporal de astilla. Si se quiere calcular las necesidades de espacio en este caso, de las experiencias que se hicieron **se obtuvo la siguiente relación entre cordones en monte y toneladas de astillas** (Tabla LIV):

t/m ³ cordón	t/m ² cordón	m ³ astilla/m ³ cordón
0,06	0,05	0,23

Tabla LIV: Densidad de la biomasa astillada.

La utilidad más importante de estas cifras es calcular la cantidad de biomasa que se obtendrá de astillar cordones de ramas de una masa como la de este estudio. No obstante, esta cifra es sólo orientativa, puesto que con el paso del tiempo los cordones merman su volumen por la pérdida de humedad y la acción de la gravedad.

9.6. Elección de medio de transporte

El acceso a los montes puede paralizar un trabajo forestal. Se debe tener en cuenta el firme de las pistas, su anchura, la pendiente y los radios de giro, así como la presencia de puentes u otros obstáculos que supongan limitaciones de gálibo. En montes con dificultad de acceso –casi todos–, los camiones deben ser apropiados para circular por caminos forestales.

Otro aspecto fundamental para la circulación por las pistas forestales es la coordinación con los demás usuarios. Se debe recorrer la zona para encontrar los otros posibles usuarios y coordinar los usos simultáneos de la pista, especialmente si es estrecha y/o se ocupa su explanada por vehículos parados.

- La primera opción para el transporte de astilla o triturado serían los **camiones rígidos** empleados normalmente para transporte de áridos (“bañeras”) tienen mayor capacidad de desplazarse en montes de peores condiciones de acceso, aunque en absoluto son todo-terreno. Pueden emplearse de dos formas:
 - En espera a ser cargados por la astilladora. Este sistema tiene alto riesgo de quedar parado fácilmente. Si el camión se retrasa o se atasca, la astilladora no puede trabajar, puesto que no tiene sistema de acumulación de astillas (*Figura 236*).
 - Astillado al suelo y recogida con pala cargadora o cargadora telescópica auxiliar. –Esta forma de trabajo permite trabajar a la astilladora a pleno rendimiento, pero el sistema incorpora un nuevo elemento, la pala cargadora, y supone una fuente adicional de impurezas. Se debería evaluar la disponibilidad de camiones, la calidad de la astilla demandada, los posibles costes de mantenimiento incrementados y el precio hora de la pala cargadora (*Figura 238*). En general, es preferible garantizar una buena logística.
- La segunda opción de transporte es el uso de **contenedores y camiones multilift**. Esta opción dota al sistema de mayor flexibilidad, aunque se requiere una diferente organización de los cargaderos, pudiendo ser necesario que la astilladora se tenga que desplazar durante el astillado con mayor frecuencia (*Figura 237*). Además, los transportistas de contenedores rara vez tienen costumbre de trabajo forestal en España, lo que puede ser fuente de conflictos.



Figuras 236 y 237: Carga en “bañera” y en contenedores.

La carga y descarga de los contenedores puede ser problemática si el suelo no es firme y está mojado por la lluvia. El otro inconveniente es que una vez depositados los contenedores en el suelo estos quedan fijos y aunque la boca de salida del material astillado es orientable se puede perder parte del material si la distancia entre el contenedor y la salida de astillas es grande.

Una opción para mejorar las operaciones, especialmente si el espacio de cargadero es pequeño, y muy especialmente para esquemas de astillado móvil, es emplear contenedores de carga lateral, que pueden ser depositados en borde de pista y manejados desde la misma, dado que no necesitan ser cargados desde el frente como los contenedores más comunes (*Figura 239*).



Figura 238: Pala auxiliar necesaria si se descarga en suelo.



Figura 239: Contenedores de carga lateral.

- Una tercera opción de transporte de astilla o triturado (e incluso de biomasa bruta) la constituyen los **camiones semirremolques o trailers de piso móvil** de alta capacidad (80 – 95 metros cúbicos aparentes, cerrados), con los que se optimiza el transporte y manejo de astillas –especialmente a largas distancias– más aún que el camión *multilift* con remolque (de 85 – 90 metros cúbicos aparentes, cerrados). Suelen requerir una pala elevadora auxiliar para ser cargados de astilla, lo que suele obligar a depositar las astillas en el suelo y después cargarlas, con los inconvenientes que ya se han citado. El problema de estos vehículos de gran capacidad es su movilidad en monte, por su amplio radio de giro y escasa adherencia en vacío.

Se debe transportar la astilla cubierta con un toldo (que es obligatorio), para evitar que pueda esparcirse por caminos, carreteras..., y en caso de lluvia, evitar que se moje y que aumente su peso con el riesgo de superar la tara permitida del camión.

Transportar astilla verde con la densidad por metro cúbico aparente estimada en algunos de los casos estudiados en este Manual (rebollo), puede conducir al exceso de los pesos máximos autorizados. El transporte, especialmente para largas distancias con vehículos tipo “piso móvil” podría optimizarse evitando el falso flete (carga del camión por debajo de su volumen máximo) mediante carrozados en aluminio.

De acuerdo con González (1987) es conveniente que el mismo contratista que se encargue del astillado sea el responsable del transporte de astillas, lo que reduce los problemas logísticos.

En cuanto a los **costes de transporte de la biomasa**, según se decida transportarla sin elaborar o una vez astillada y el medio de transporte, se van a estimar para las siguientes opciones principales:

- para la biomasa bruta, considerando la carga directa de la misma en camiones, y
- para la astilla, considerando su astillado y la posterior carga de la astilla

Se supondrá que todo ello se produce de forma inmediata a la corta, para no complicar los cálculos. En la práctica, cabe también considerar la posibilidad de dejar que los árboles y/o la propia astilla se sequen durante su almacenamiento en el cargadero. Con ello, aunque se reduzca el peso de biomasa y, por ello, se aumenten los costes de su transporte en térmi-

nos unitarios, también se incrementa notablemente su poder calorífico, con lo que se pueden obtener mayores remuneraciones por el consumidor.

Sin tener en cuenta esta posibilidad, que se estima complicada en muchos casos por el incremento en los riesgos de incendios y/o plagas, se presenta un primer estudio de costes de la elaboración inmediata y el transporte de biomasa verde), valorando las siguientes posibilidades:

- 1.- **Transportar la biomasa bruta** directamente al centro de consumo, **empleando el mismo autocargador** que extrae del monte (capacidad de carga de 33 metros cúbicos aparentes, que equivalen a unas 4,2 t de biomasa).
- 2.- **Transportar la biomasa bruta** utilizando un **camión de caja rígida**, cerrada y equipada con grúa. Este tipo de camión puede acceder sin problema si trabajamos en montes de acceso complicado (capacidad de carga de 50 metros cúbicos aparentes, que equivalen a 6,5 toneladas en verde).
- 3.- **Transportar la biomasa bruta en un camión semi-remolque cerrado** (tipo *trailer*) de 70 metros cúbicos aparentes de capacidad. Este tipo de camión podría acceder a montes sin malas condiciones de acceso e incluso, dependiendo de la experiencia del transportista, a montes con condiciones de acceso regulares.
- 4.- **Astillado “fijo” en cargadero y transporte en camión de caja rígida cerrado** –o camión *multilift*–. Sería lo propio de montes con condiciones malas de acceso, aunque el camión *multilift* puede encontrarse con problemas en el manejo de los contenedores en tiempo húmedo, por lo que en principio se supondrá un camión de caja rígida (carga total, para 50 metros cúbicos aparentes, de 13,5 t).
- 5.- **Astillado “fijo” en cargadero y transporte en camión de piso móvil** de 88 metros cúbicos aparentes, en el presente caso se obtiene un peso de carga de casi 24 toneladas, por debajo del máximo legal.

Así pues, se comparan los esquemas de costes para montes de acceso complicado en que las alternativas serían el autocargador y el camión de caja rígida –sea para transportar biomasa bruta o astillas– con montes con condiciones de acceso buenas o intermedias, en que se supone que se podrán emplear *trailers* para los transportes. Los resultados de dichas comparaciones se muestran en las *Figuras 240 y 241*.

En los montes de acceso difícil, como se aprecia en la *Figura 240*, el transporte utilizando el propio tractor autocargador de desembosque sólo es la alternativa más rentable los 4 primeros kilómetros. Entre 4 y 15 kilómetros lo más rentable sería un camión de 50 m³ transportando biomasa bruta. A partir de 15 km es más barato transportar astilla en camión *multilift*. Esto indica que el propio autocargador podría interesar para transportar biomasa a cada Centro Logístico sólo desde montes muy cercanos.

En los montes de mejor acceso (*Figura 241*), en los primeros 20 km la opción más rentable es el camión con semirremolque y a partir de 20 km empiezan a hacerse rentable el transporte de astillas en camiones. Siempre es más económico el transporte de astillas en camión de piso móvil. La dificultad de este sistema de transporte es su especificidad y los retornos (viajes de vuelta) los suele hacer en vacío, lo que encarece el coste.

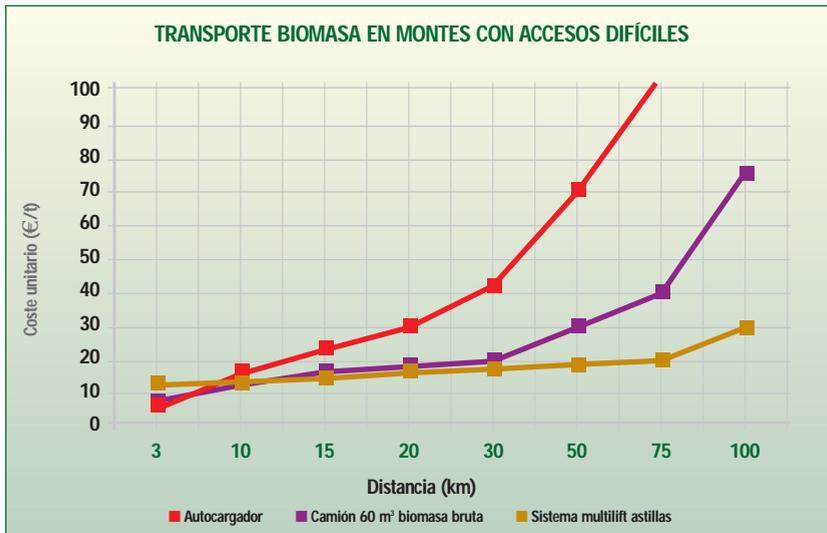


Figura 240: Costes de transporte en montes difíciles.

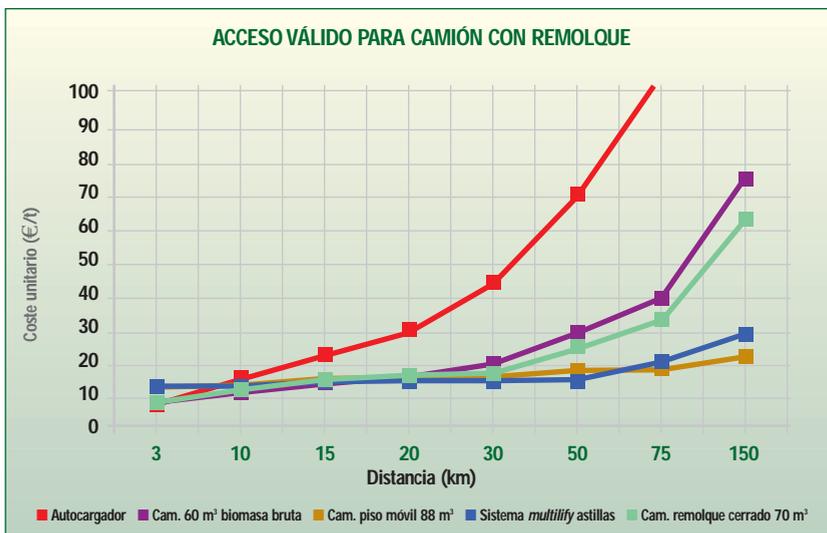


Figura 241: Costes de transporte en montes de buen acceso para camiones semi-remolques o trailers.

9.7. Recomendaciones de ejecución. rendimientos, valores observados y referencias

9.7.1. Apeo y apilado de residuos integrado en apeo y procesado con cosechadora

En un aprovechamiento integrado, el que considera el aprovechamiento de la biomasa posterior al de madera, las cosechadoras que apean, desraman, procesan madera y acordan los restos. Esta última operación no se ejecuta en los aprovechamientos de madera tra-

dicionales. En los países nórdicos se exige el acordonado de los residuos fuera de las calles de tránsito de las máquinas (OPET & VTT, 2001; Laitila, 2005) y se ofrece en compensación un plus al maquinista. Según las experiencias llevadas a cabo en Castilla y León, para una corta a hecho de *Pinus pinaster* Ait., la operación de acordonado supone un aumento del 20% del tiempo empleado por árbol (Figura 242).



Figura 242: Aspecto de los cordones formados por la procesadora.

Es esencial que esta operación se realice adecuadamente, porque la saca de madera y el paso de la misma procesadora, si las máquinas pisan las ramas y copas, hacen que sean difíciles de recoger, además de mezclarlas con tierra y piedras, perjudicando en gran medida la calidad del biocombustible (Kallio y Leinonen, 2005). Todos los autores recomiendan la adopción de métodos de trabajo específicos en la corta mecanizada de madera para dejar los residuos acordonados. Generalmente, para los sistemas de aprovechamiento de “madera larga” o de “madera a longitudes variables” que se aplican en los países nórdicos, se recomiendan los sistemas de “un lado de calle” o dos lados de calle” que se ilustran en la Figura 243 (Hakkila, 1998; citado en Kalio y Leinonen, 2005). La productividad se considera ligeramente mayor en el primer sistema (OPET y VTT, 2001).

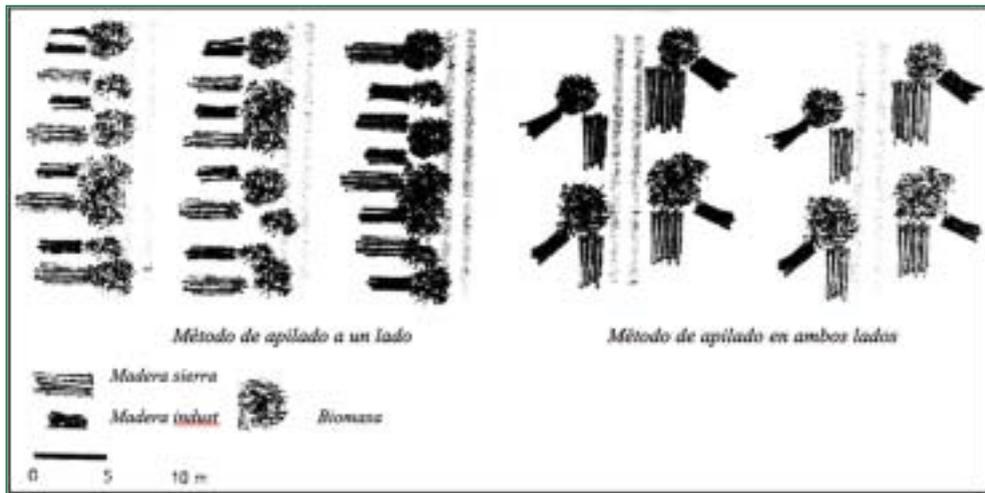
258

En las experiencias llevadas a cabo por el CIS-Madera y la Universidad de Vigo en Galicia (Sanz y Piñero, 2002), se puso de manifiesto la pérdida de rendimiento debido a encontrarse el material disperso en el monte, obteniéndose rendimientos muy bajos para la recogida y apilado (3,2 t verdes/h en pino y 4,0 t/h en eucalipto).

De hecho, en Finlandia, las grandes compañías madereras (Stora-Enso, UPM y Metsäliitto) son las principales suministradoras de combustibles forestales procedentes de cortas a hecho, si bien normalmente los ejecutores son maquinistas y transportistas subcontratados, bien por la propia compañía o por alguna filial energética.

El aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas a hecho de pinares de pino

El coste de compensación que se debe pagar a los maquinistas de cosechadora por los cambios del sistema de trabajo para apilar adecuadamente los residuos oscila entre los 0,3 €/m³ (Laitila, 2005) y los 0,8 €/m³ (Väättäinen, 2007).



En todo caso, cabría hacer un hincapié especial en las técnicas para que este acordonado se produjera sin incorporar tierra o piedras innecesariamente.

En las gráficas de las Figuras 244 y 245 se muestra la productividad de la cosechadora en la corta a hecho de pino resinero (Quintana Redonda) comparando el apeo, desramado y procesado sin formación de cordones (Sistema 2 b) con las mismas operaciones pero apilando los restos en un cordón (Sistema 2 a). Existe una diferencia de productividad que se ex-

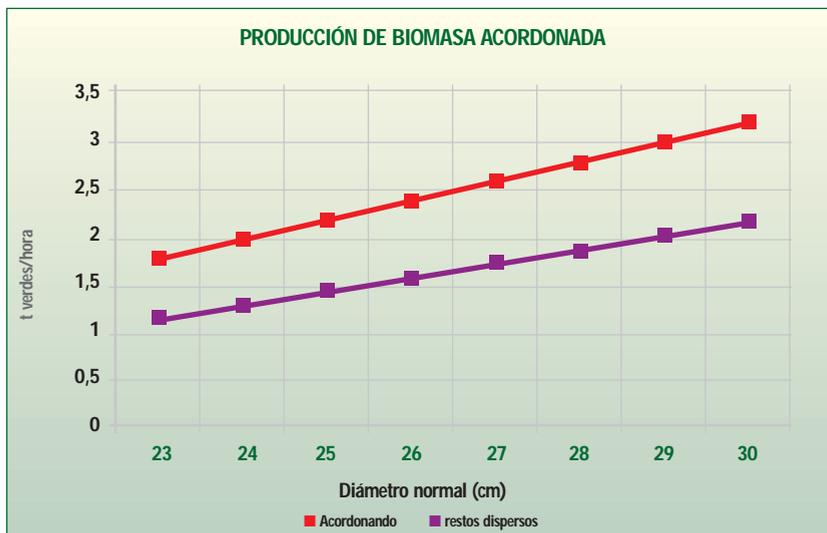


Figura 244: Productividad de la cosechadora en biomasa según se acordonen los restos o se dejen dispersos.

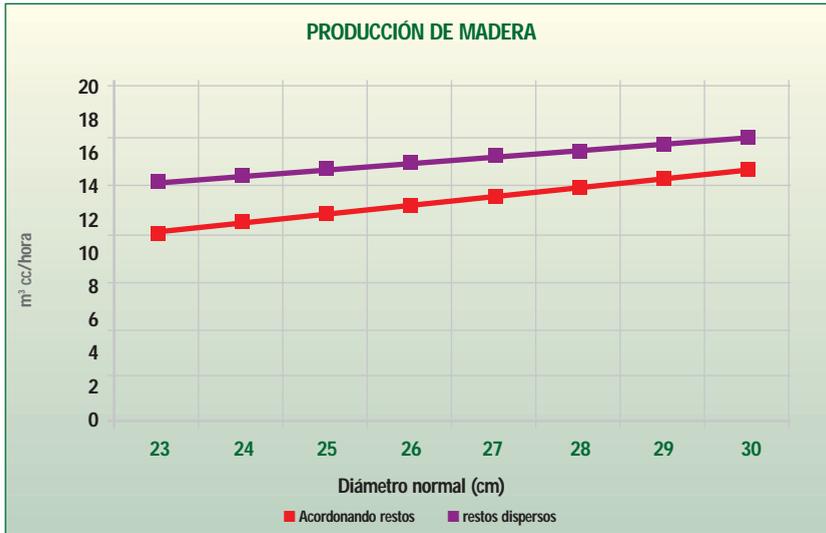


Figura 245: Productividad de la cosechadora en madera cortando y clasificando madera según se acordonen los restos o se dejen dispersos.

plica por la formación de cordones. Esta diferencia se mantiene casi constante con la oscilación del diámetro. La productividad para cada producto – biomasa o madera – y en cada caso, en cambio, sí aumenta como es habitual con el diámetro de los árboles apeados.

9.7.2. Desembosque de biomasa

Esta operación aparece en los esquemas de trabajo de astillado fijo en cargadero, ya sean integrados o no integrados. El objetivo es optimizar la operación del astillado o triturado junto a pista, disminuyendo el tiempo de trabajo de esta máquina, de coste horario elevado, y trasladando ese trabajo a máquinas con menor coste horario. Las opciones técnicas de esta operación de saca de biomasa bruta son el tractor agrícola con remolque o el autocargador.

9.7.2.1. Opciones tecnológicas

Los autocargadores utilizados en la saca de biomasa en las experiencias de Castilla y León fueron un Timberjack de 22 m³ de capacidad de carga y 182 CV empleado en el aprovechamiento integrado (Sistema 1, en Quintana Redonda, se muestra en la *Figura 246* y un Dingo de 150 CV y 16 m³ para el aprovechamiento no integrado (Sistema 3, en Pinar Grande).

La capacidad de carga afecta al rendimiento como se indica en la *Figura 248*. Esta capacidad viene limitada por el volumen ocupado por la biomasa bruta. La maquinaria utilizada habitualmente en la saca de madera tiene las siguientes capacidades de carga, sin modificar o ampliar los remolques:

- Tractor agrícola adaptado, con remolque: 2,7 t verdes por carga
- Tractor autocargador, escandinavo: 5 t verdes/carga
- Tractor autocargador, nacional: 4,5 t verdes por carga

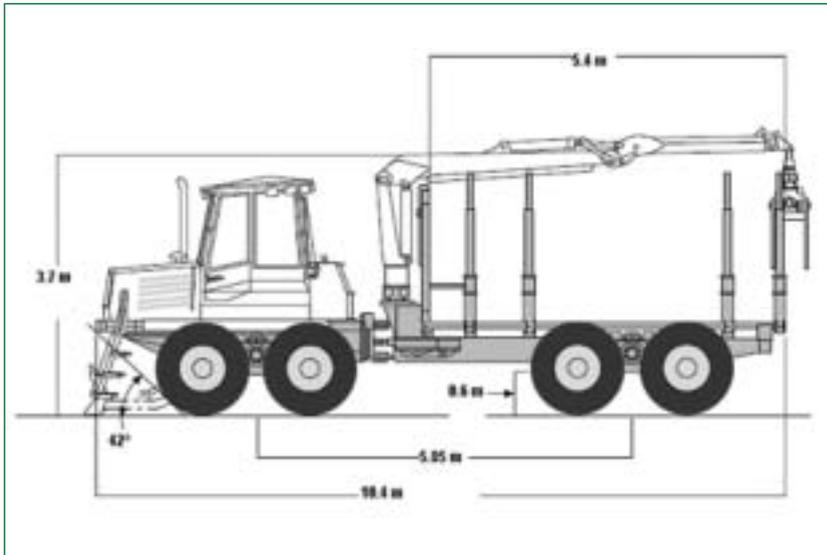


Figura 246: Esquema de dimensiones del autocargador Timberjack 1410 utilizado en Quintana Redonda.

En las experiencias de Castilla y León, el **autocargador escandinavo Timberjack 1410** llevó una media de **4,3 t por viaje** para restos recién cortados de pinaster, y **4,0 t el autocargador nacional Dingo**, con el material (restos de silvestre) seco durante los meses de **julio y agosto**, lo que parece poner de manifiesto lo correcto de esas referencias.

Existen variantes técnicas de estas máquinas que optimizan el rendimiento:

- Pinzas adaptadas para la saca de biomasa que mejoran la operación de carga.
- Teleros extensibles para aumentar la capacidad de carga.
- Paredes abatibles, que comprimen la carga, con el mismo fin.

9.7.2.2. Condicionantes

Los factores que más afectan a la productividad en la saca de biomasa son la distancia de desembosque y el estado de los residuos (agrupamiento y fragmentación).

La productividad es mayor en el caso de aprovechamiento integrado, donde el autocargador trabajó sobre cordones formados por procesadora. En el aprovechamiento no integrado (Sistemas 3 a y 3 b), el autocargador trabajó sobre material disperso y sobre cordones formados por un tractor con un apero frontal con forma de peine, pero no se alcanzó el grado de agrupamiento de la experiencia integrada y además el material estaba más fragmentado.

Los valores medios de rendimientos observados en las experiencias de Castilla y León son para el autocargador Timberjack sacando la biomasa previamente agrupada en cordones, de 10,2 t verdes de biomasa cada hora de trabajo productivo y para el caso del Dingo sobre restos dispersos y aplastados en parte en la saca con skidder, sólo de 3,2 t verde de biomasa por hora de trabajo productivo.

Rendimiento del autocargador recogiendo biomasa con distinto grado de acordonamiento		
	m ³ /hora	t/hora
No integrado: Dingo sobre restos dispersos (Sistema 3 b)	14,3	3,2
Integrado: Timberjack sobre biomasa acordonada (Sistema 2 a)	19	10,2

Tabla LV: Productividad del desembosque

Un análisis más detallado de cómo afecta el material de trabajo se obtiene si se considera exclusivamente el tiempo que invierte el autocargador en cargar el remolque, sin incluir los desplazamientos hasta y desde el cargadero, entonces el rendimiento obtenido es el que refleja la *Tabla LVI*.

	Dingo	Timberjack
Rendimiento de la operación de carga (m ³ /h)	31,2	86,7

Tabla LVI: Rendimiento de la operación de carga en autocargadores

El rendimiento del autocargador Timberjack es casi tres veces mayor que el Dingo, esto se explica por el mayor grado de amontonamiento de los restos. La diferencia de rendimiento se debe fundamentalmente a la operación de carga, es decir el tiempo que invierte la grúa en llevar biomasa del suelo al remolque. Para el primer caso, con 24 viajes de la grúa se llenaba un remolque, en el segundo eran necesarios 58, lo que en tiempo supuso un aumento del 90% del tiempo productivo. Además, el autocargador nórdico tenía mayor capacidad volumétrica de carga.

Para evaluar los factores que influyen sobre los rendimientos del autocargador Timberjack, se han ajustado las ecuaciones predictivas que se presentan en los siguientes gráficos.

En la *Figura 247* se cuantifica el efecto de la distancia de desembosque en la productividad de la saca. Conforme aumenta la distancia disminuye el rendimiento del autocargador. Además, en la misma *Figura 247* se ha variado también la longitud de cordón necesaria para llenar un autocargador, es decir, el grado de agrupamiento de los restos, y cuanto más biomasa esté concentrada en menor longitud de cordón, mayor rendimiento obtiene el autocargador. En la *Figura 248* se representa el efecto de la capacidad de carga del autocargador.

9.7.3. Astillado

El astillado es el procesado de la biomasa bruta transformándola en astillas, que tienen unas características más adecuadas para el transporte. La operación de astillado supone dar un valor añadido a la biomasa, que pueden ser en algunos casos el producto final para la producción de calor o energía eléctrica. En otros casos estas astillas deberán ser procesadas para adaptarlas al consumidor.

Los esquemas de trabajo propuestos en este manual contemplan dos tipos de astillado en monte:

Astillado fijo. La biomasa bruta ha sido previamente recolectada y amontonada en cargaderos junto a la pista. La astilladora en este sistema apenas se desplazaría.

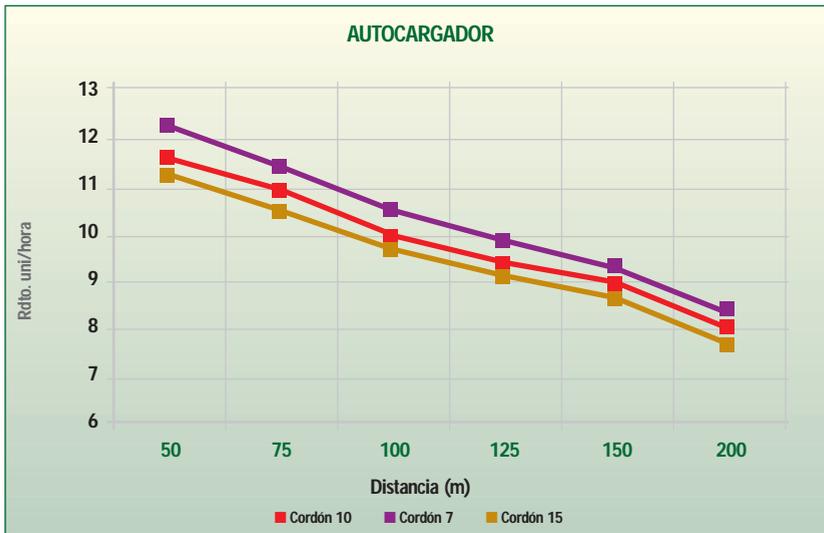


Figura 247: Productividad del autocargador.

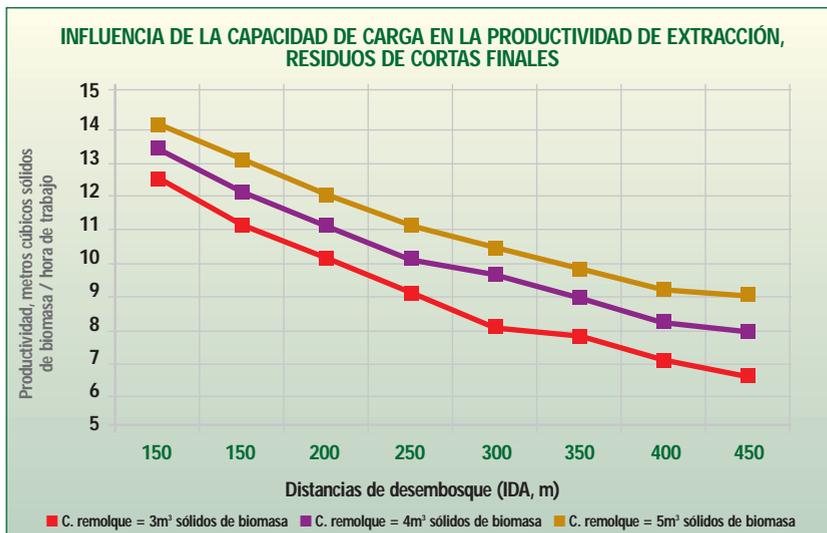


Figura 248: Influencia de la capacidad de carga del autocargador.

Astillado móvil. La astilladora entra en la zona de corta a recolectar la biomasa bruta, que se puede encontrar agrupada en cordones o bien dispersa. En este caso la astilladora saca la biomasa bruta en forma de astilla hasta la pista.

9.7.3.1. Descripción general de la máquina

La astilladora que se empleó en las experiencias de Castilla y León fue una *Erjo* sobre autocargador *John Deere* 1410 (Figura 249). La astilladora se compone de un tambor con dos cuchillas de acero, de 90 cm de longitud. Este tambor está cubierto por una carcasa me-



Figura 249: Astilladora sobre autocargador.



Figura 250: Mesa de alimentación y cuchilla.



Figura 251: Cambio de cuchilla del tambor.



Figura 252: Interior del container de la astilladora y cabezal de grúa plegado.

tánica y el material accede a él a través de una bandeja de alimentación y un rodillo de alimentación (Figura 250) que con su movimiento circular presiona y circula el material hacia el tambor.

264

Las cuchillas (Figura 251) astillan el material que es propulsado por unas paletas a través de un cañón a un contenedor de 22 m³ de capacidad (Figura 252). El tambor puede girar a 800 rpm y tiene 450 CV. Esta astilladora tiene la ventaja de poder acceder a lugares de acceso difícil, incluso entrar al monte a astillar, haciendo también la saca del material hasta cargadero. Es un conjunto mecánico muy pesado que alcanza las 27 t de peso. Esto hay que tenerlo en cuenta en suelos de poca capacidad portante y en época de lluvias.

Definiendo el tiempo productivo como el tiempo invertido directamente en el procesamiento de la biomasa y por otro lado el tiempo de trabajo indirecto que sería la suma del mantenimiento, averías y cambio de cuchillas, el conjunto astilladora-autocargador mostró la distribución de tiempos que ilustra la Figura 253.

El cambio de cuchillas supuso el 4 %, como promedio, del tiempo de trabajo; sin embargo, en los casos en los que además de ejecutar la eliminación de residuos se buscaba la

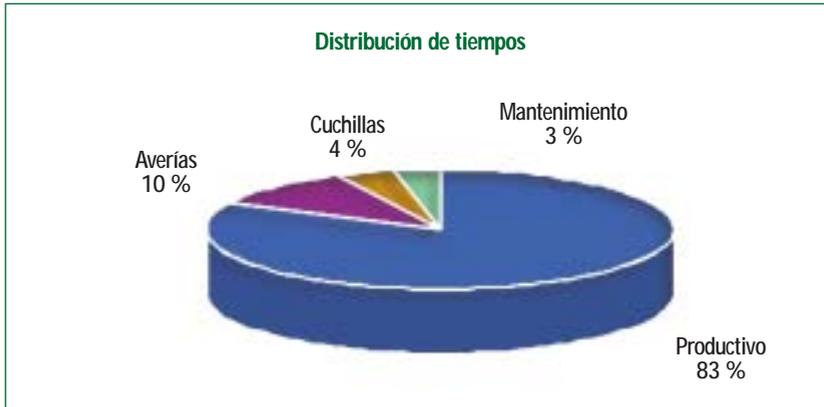


Figura 253: Distribución de tiempos de la astilladora.

calidad de la astilla, el tiempo empleado en el cambio de cuchillas llegó a alcanzar el 17%, reduciéndose el tiempo productivo a menos del 70 %.

Las cuchillas afiladas astillan mediante corte. Conforme se van usando, el filo se haciendo más romo y predomina la ruptura por impacto, generándose un material más heterogéneo y con mayor proporción de partículas finas y polvo, características poco valoradas por los consumidores de astilla.

9.7.3.2. Rendimientos medios de la máquina

En las experiencias desarrolladas, tanto en el aprovechamiento integrado como en el no integrado, se puso en práctica el astillado móvil y el fijo, con los rendimientos que refleja la *Tabla LVII*.

Productividad tiempo de trabajo	Sistema integrado		Sistema no integrado	
	t/h	m ³ /h	t/h	m ³ /h
Astillado fijo en cargadero	12,6	44,2	6,1	27,1
Astillado móvil sobre cordones	8,3	29,1	2,3	10,2
Astillado móvil sobre material disperso	4,0	14,0	2,3	10,2

Tabla LVII: Rendimientos del astillado (sobre tiempo de trabajo)

Los rendimientos en el Sistema integrado con *Pinus pinaster* Ait. fueron casi el doble que en el Sistema no integrado de *Pinus sylvestris* L. para astillado en cargadero y más de tres veces más para astillado del material acordonado. La diferencia de rendimientos se explica porque el material de pinaster, estaba más agrupado, limpio y menos fragmentado. El aprovechamiento con *skidder* y motoserista generó un material que fue pisado, fragmentado y mezclado con tierra.

La gran diferencia en el rendimiento sobre cordones en los dos aprovechamientos se explica porque el acordonado en el sistema integrado fue mayor, de más calidad por estar más limpio. Además, en el aprovechamiento integrado, junto con las ramas, también se astillaron

algunas trozas del fuste con destino a la industria de trituración. Esto aumenta la productividad notablemente, como se expone más adelante.

Si, además, se miran los rendimientos en peso, la diferencia es aún mayor, dado que en *Pinus sylvestris*, el material estaba considerablemente más seco.

El amontonado de restos es desde luego un factor importante que afecta al rendimiento de la astilladora. Las tablas de tiempo, acordes con los estándares y definiciones propuestas por la Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal, IUFRO (Bjoherden y Thompson, 1995), muestran esta diferencia. Además las últimas tolvas procesadas por la astilladora en los montones de restos han supuesto más tiempo que las tolvas anteriores de los montones. Si se consideran los siguientes grados de amontonamiento:

- 1.- Material amontonado en cargadero con autocargador y grúa.
- 2.- Última tolva de astillas procedente del cargadero, corresponde a restos más dispersos.
- 3.- Material amontonado en cordones formados en el aprovechamiento integrado.
- 4.- Material disperso de un apeo y procesado de madera mecanizado que no acordona los restos.

Si a cada grado se le asigna el rendimiento en toneladas por hora, se obtiene el gráfico de la *Figura 254*, correspondiente al rendimiento de astillado después de un aprovechamiento mecanizado:

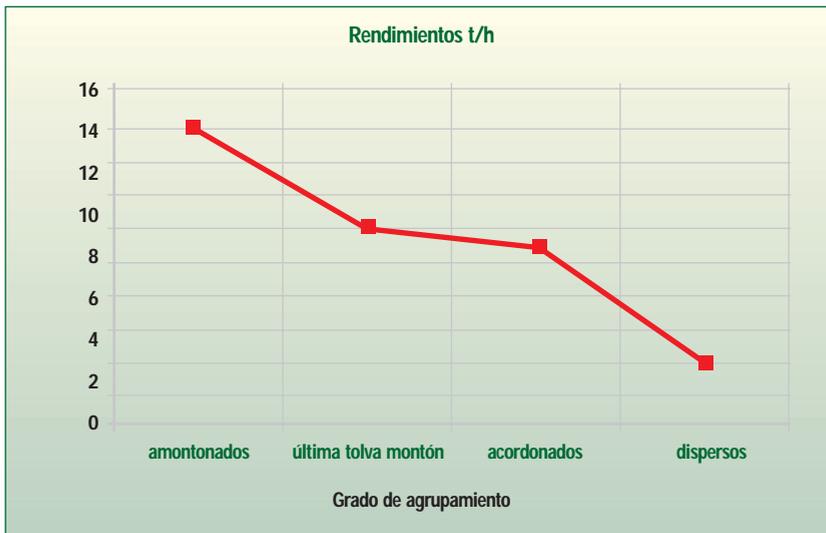


Figura 254: Análisis del rendimiento de astillado (por hora de trabajo) según el grado de agrupamiento de la biomasa tras un aprovechamiento mecanizado integrado con el de madera.

9.7.3.3. Astillado fijo

El astillado fijo se puso en práctica tanto en el sistema integrado como en el no integrado.

Las diferencias en el reparto entre las tareas consideradas para el astillado fijo entre

El aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas a hecho de pinares de pino

ambas experiencias se observan en la *Figura 255*, en las que las definiciones de las fases del trabajo consideradas son las siguientes:

- **Desplazamiento de la grúa a por carga:** La grúa de la astilladora, en vacío se dirige al montón de astillas.
- **Alimentación y empuje:** Desde que la grúa contacta con el material en el suelo o montón hasta que deposita las ramas en la bandeja de alimentación.
- **Apoyo alimentación:** La grúa espera y/o incluso ayuda al rodillo de alimentación a introducir la carga hasta el tambor astillador.
- **Desplazamiento en vacío:** La astilladora se dirige con el contenedor vacío hasta el material a astillar.
- **Desplazamiento cargado:** La astilladora con el contenedor lleno se dirige a descargar el material.
- **Desplazamiento semicargado:** El desplazamiento que se produce durante el ciclo de trabajo con el contenedor parcialmente lleno y con el objetivo de aproximarse al próximo montón/cordón de restos vegetales.
- **Descarga:** La astilladora se coloca en posición de descarga y vuelca el contenedor en el suelo o camión.
- **Coloca montón:** La operación de amontonar restos vegetales en el suelo.

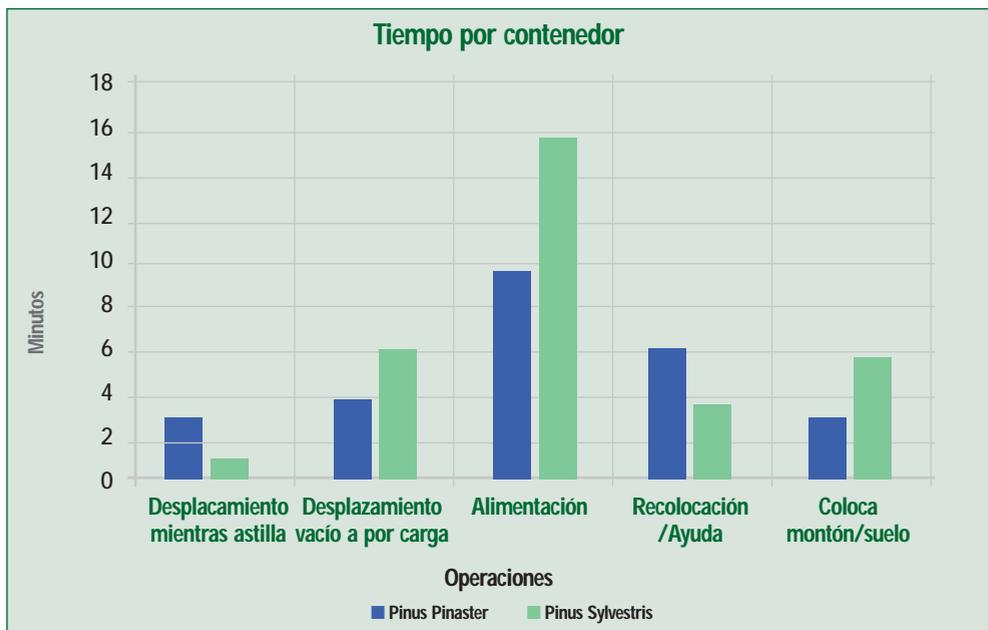


Figura 255: Análisis de las operaciones de trabajo de la astilladora Erjo.

La mayor diferencia de tiempos entre los dos sistemas se da en la operación de alimentación. Cualitativamente es la operación de colocar ramas en el suelo para la carga la de mayor diferencia. Además, el material del *Pinus sylvestris* L. estaba más fragmentado y eso también lo demuestra que para llenar un contenedor de la máquina fueron necesarios 38 viajes de la grúa de promedio en el sistema integrado y 64 en el sistema no integrado.

En el astillado de material disperso en el sistema integrado, el rendimiento fue todavía más bajo que el registrado en los cordones, ya que disminuyó todavía más la cantidad de material vegetal que la grúa enganchaba en cada viaje. En Pinar Grande, en cambio, no existió diferencia entre cordones y material disperso. Por tanto, el trabajo del tractor con apero frontal en forma de peine que acordonó una zona del aprovechamiento no ayudó a la mejora del rendimiento. Los cordones que pudo formar no supusieron un agrupamiento suficientemente distinto del inicial.

El rendimiento del astillado fijo en el sistema integrado estuvo influido también por el astillado o no para uso energético de las trozas que actualmente se utilizan para trituración. En el cargadero en que la biomasa incluía estas trozas, se alcanzaron rendimientos máximos de hasta 17,4 t/h de material verde, siendo la media de 13,1 t/h. En cambio, en el cargadero de biomasa con sólo ramas y rabeón, sin las trozas con destino en trituración, el rendimiento medio fue de 10,2 t/h.

9.7.3.4. Astillado móvil

El astillado móvil es una opción que ahorra el trabajo de un autocargador o cualquier otro medio de saca. Sin embargo, debido al elevado coste horario de la astilladora, el balance global de costes puede no resultar interesante.

Las diferencias de rendimientos entre un aprovechamiento mecanizado y uno con motosierra y *skidder* para un astillado móvil ya se han apuntado.

El astillado móvil, en el caso del aprovechamiento mecanizado, no estuvo condicionado por la presencia o ausencia en los cordones de las trozas que han ido tradicionalmente destinadas a trituración, a diferencia del astillado fijo, donde sí fue influyente.

Otra de las opciones que se experimentó fue la posición de la astilladora respecto al cordón:

- Eje principal de la astilladora perpendicular al cordón
- Eje principal de la astilladora paralelo al cordón.

La forma de trabajo perpendicular aumentó el rendimiento en un 7 % frente a la forma de trabajar en paralelo.

En el posicionamiento perpendicular la grúa es más eficaz alimentando la astilladora, y en la colocación del material en el suelo. Estas dos operaciones contrarrestan el mayor tiempo empleado en el desplazamiento. Esta misma máquina trabaja también mejor de forma perpendicular al montón cuando se trata de ramas de chopo “apiladas con una pala cargadora frontal o “grapa”.

Uno de los montones procesados estaba en pendiente. El tiempo productivo invertido en llenar una tolva fue de 41 minutos. Este tiempo no es significativamente distinto de la media de los tiempos productivos del astillado móvil, que es de 37,5 minutos. Sin embargo, sí que fue uno de los valores más altos.

9.7.3.5. Comparación de astillado móvil y fijo

En la siguiente *Tabla LVIII* se muestra la distribución de tiempos y rendimientos de la

El aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas a hecho de pinares de pino

astilladora trabajando en el sistema integrado, según sea sobre cordón (Sistema 2 a) o en cargadero (Sistema 1):

Rendimiento sobre cordón	Rendimiento en cargadero
8.3 t/h	12.6 t/h

Tabla LVIII: Rendimientos de las astilladora sobre tiempo de trabajo

Si se representa la distribución porcentual del tiempo productivo, la descarga de la tolva suponía hasta un 15% del tiempo de trabajo cuando se hacía en la caja de un camión de piso móvil, pero si se hacía en el suelo el tiempo era significativamente menor. Como la opción suelo o camión dependía de la presencia de éste y no del sistema de astillado, se ha prescindido del tiempo de esta operación para homogeneizar la comparación.

El tiempo que hace diferentes a las dos formas de trabajo es el invertido en la operación de colocación de restos en el suelo formando un montón de mayor volumen. En el astillado de cordones se invertía más tiempo en colocar primero los restos en el suelo para después alimentar la astilladora. En los montones del cargadero de restos junto a pista los restos estaban más apilados y por tanto el maquinista no necesitó recurrir tanto a esta maniobra.

El desplazamiento también es una operación que tiene más relevancia en el astillado móvil que en el fijo. En el astillado móvil los cordones estaban más lejos de la pista donde estaba el camión sobre el que se descargaban las astillas.

En el sistema de trabajo fijo, el cuello de botella es la bandeja de alimentación, y en el astillado móvil es la capacidad de la grúa, junto con el apilado de restos.

El análisis del índice de astillado, es decir, el tiempo que la astilladora astilla frente al tiempo productivo directo de la grúa (colocación de restos en suelo, alimentación, apoyo a la alimentación y desplazamiento de la grúa en vacío a por carga) es superior en el astillado fijo (Figura 256). Este índice da una idea de eficacia del uso de la astilladora, cuan-



Figura 256: Comparación del índice de astillado para el sistema de trabajo fijo y móvil.

to menor es el índice, mayor es el tiempo transcurrido entre que la astilladora procesa una carga de la grúa y la siguiente. A mayor índice mayor capacidad de la astilladora se está poniendo en desarrollo.

9.8. Estimación de costes del suministro de biomasa

Para analizar el coste final de la tonelada de astilla se han considerado los siguientes precios horarios por máquina (*Tabla LIX*):

Coste horarios	€/h
Cosechadora	77
Autocargador	55
Astilladora	130

Tabla LIX: Costes horarios

Además, se han añadido los costes indirectos asociados a la actividad empresarial, un 15% del valor neto de las astillas, y un beneficio empresarial del 12 %.

9.8.1. Costes del aprovechamiento mecanizado

Se reflejan en la *Tabla LX*. El coste atribuido a la cosechadora o “procesadora” es debido a la pérdida de rendimiento al hacer cordones con las ramas y puntas de los fustes.

	Procesadora €/t	Autocargador €/t	Astilladora €/t	Transporte €/t	Total *
Astillado en cargadero (Sistema 1)	5,3	4,9	16,7	6	41,8
Astillado móvil sobre cordones (Sistema 2 a)	5,3	0	22,5	6	42,9
Astillado móvil sobre restos dispersos (Sistema 2 b)	0	0	40,6	6	59,2

Tabla LX: Costes unitarios por tonelada verde de biomasa

*Incluidos costes indirectos y beneficio empresarial.

9.8.2. Costes del aprovechamiento con motosierra y skidder

La agrupación de los restos se hizo con un tractor con un peine, pero debido a las irregularidades del terreno, a los tocones y al hecho de que la biomasa estaba bastante seca, esta operación no logró agrupar los restos de una manera significativa que aumentara el rendimiento de la astilladora móvil. También se empleó a un motoserrista para trocear algunas copas demasiado grandes para la astilladora, no se ha considerado su coste porque en un aprovechamiento integrado esta operación la debería hacer la cuadrilla de apeo. Los costes unitarios correspondientes a las diferentes variantes se presentan en la *Tabla LXI*.

	Autocargador €/t	Astilladora €/t	Transporte €/t	Total *
Astillado en cargadero (Sistema 3)	19,03	23,2	6,0	61,2
Astillado móvil sobre cordones (Sistema 4 a)	0,0	61,4	6,0	85,6
Astillado móvil sobre restos dispersos (Sistema 4 b)	0,0	61,4	6,0	85,6

Tabla LXI: Costes unitarios por tonelada verde de biomasa

9.8.3. Análisis de costes comparativo del aprovechamiento de madera con destino industria de trituración y/o biomasa

En el despiece del fuste de un árbol las trozas de menor diámetro con aprovechamiento son las que corresponden a la fracción que actualmente va destinada a la industria de trituración. Esta fracción también podría ir destinada, junto con ramas y rabeón, al aprovechamiento de biomasa con fines energéticos, aumentando la productividad de éste.

Teniendo en cuenta los resultados de los rendimientos de las máquinas en las experiencias estudiadas, asignando a cada máquina su coste horario y suponiendo un precio de compra de la materia prima concreto, en la siguiente tabla se analizan las 5 opciones posibles en un aprovechamiento integrado y mecanizado considerando los distintos sistemas de trabajo y las opciones de aprovechamiento de madera con destino industria de trituración (sólo madera de industria, sin sacar biomasa), aprovechamiento combinado de madera de industria y biomasa, aprovechamiento sólo de biomasa (incluyendo como tal la fracción de madera de industria).

En el cuadro de la Tabla LXII aparecen sólo los costes que diferencian los distintos sistemas, por tanto no se están comparando los costes absolutos de las distintas opciones. El balance final expuesto, de igual manera, es un balance relativo a los costes que diferencian los sistemas expuestos.

El coste de la cosechadora que se carga sobre la biomasa es el coste de la pérdida de rendimiento por la operación extra del acordonado de restos. Por ello, este coste se imputa en la fase de aprovechamiento de biomasa y no para el aprovechamiento tradicional de madera de industria, con lo cual los balances no son valores absolutos, sino que deben emplearse a efectos comparativos entre los sistemas (piénsese que tampoco se han incluido costes indirectos o beneficios). En las productividades registradas de la procesadora (en el apeo, desramado, tronzado y acordonado) no se ha registrado ninguna diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento de la máquina cuando las trozas inferiores a 14 cm de diámetro se situaban en el cordón de biomasa o se separaban y apilaban con el resto de la madera, por lo que no se ha considera una diferencia de costes entre dichos casos.

El desembosque es el transporte de la materia prima desde el monte hasta un cargadero junto a pista. Para el rendimiento del desembosque de madera de industria se han utilizado los tiempos tomados de dos ciclos completos del autocargador sacando madera de industria, que dio como resultado 8 m³/h de tiempo de presencia. En el transporte se ha considerado una distancia de 40 km y los precios que recibiría la empresa de aprovechamiento de biomasa por la madera y la biomasa en destino se han considerado como 34€/t de madera de industria y 42 €/tonelada de astilla, ambas en verde.

	Aprovechamiento sólo de madera de industria (dejando la biomasa en el monte)		Aprovechamiento combinado de madera industria y biomasa (sólo ramas y rabeón) con acordonado de restos y astillado móvil		Aprovechamiento sólo de biomasa (ramas, rabeón y trozas destino industria) con acordonado de restos y con astillado móvil		Aprovechamiento combinado de madera industria y biomasa (sólo ramas y rabeón) con acordonado de restos y astillado fijo en cargadero		Aprovechamiento sólo de biomasa (ramas, rabeón y trozas destino industria) con acordonado de restos y con astillado fijo en cargadero	
	Madera	biomasa	Madera	biomasa	Madera	biomasa	Madera	biomasa	Madera	biomasa
Procesadora (pérdida rendimiento) (€/t)	0,0	5,3	0,0	5,3	0,0	5,3	0,0	5,3	0,0	5,3
Autocargador (€/t)	4,9	0,0	4,9	0,0	4,9	0,0	4,9	7,2	4,9	4,7
Astillado en monte (€/t)	0,0	22,5	0,0	22,5	0,0	22,5	0,0	16,5	0,0	11,7
Transporte (€/t)	7,0	6,5	7,0	6,5	7,0	6,5	7,0	6,5	7,0	6,5
Producción (t)	1,0	2,2	1,0	2,2	1,0	3,2	1,0	2,2	1,0	3,2
Costes relativos (sin contar costes de producto en pie y fijos de explotación)	11,9	75,3	11,9	75,3	109,5	78,1	11,9	78,1	90,2	90,2
Balance relativo por t producida	18,7	14,1	14,1	-6,6	10,4	19,9	10,4	19,9	19,9	19,9
	543,1	931,5	931,5	-393,6	694,6	1.300,6	694,6	1.300,6	1.300,6	1.300,6

Tabla LXII: Balance relativo de los sistemas de aprovechamiento integrado mecanizado.

Para el astillado se han introducido los distintos rendimientos según se haya astillado en monte sobre cordón o en cargadero y la presencia o ausencia de madera de industria en el astillado también se ha considerado.

A la vista de los rendimientos y de los precios de venta planteados, **el sistema de aprovechamiento de biomasa sola, astillando la madera de industria en cargadero, es el de mayor rentabilidad por tonelada producida**, porque a pesar del coste mayor de extracción de biomasa, el aumento de la producción (por cada t de madera de industria, se producen 2,2 t de biomasa) y el mayor precio de venta hacen más ventajoso este sistema. **Este sistema sería seguido, a poca distancia, por la producción “tradicional” de madera de industria, dejando la biomasa de menor dimensión en el monte. El peor sistema sería el astillado móvil de la biomasa incluyendo la fracción de madera de industria.**

Sin embargo, **si se considera como referencia la unidad de superficie, y teniendo en cuenta el aumento de la producción de materia prima en verde por ha**, entonces el aprovechamiento exclusivo de madera de industria pasa a ser el penúltimo según el balance por unidad de superficie, sólo por delante del aprovechamiento exclusivo de biomasa con astillado móvil, y **los aprovechamientos de biomasa de forma conjunta con la madera de industria (astillado fijo o móvil de las ramas y rabezones) y sobre todo el aprovechamiento de biomasa sólo (astillado fijo incluyendo la madera de industria) resultarían más rentables que el aprovechamiento de madera de industria, dejando el resto de la biomasa en el monte.**

Como se ha explicado inicialmente, la *Tabla LXII* considera sólo los costes diferenciales entre los sistemas. Existen además otros aspectos que se podrían valorar, como las fianzas por eliminación de residuos que aparecen en los pliegos de condiciones de las subastas de lotes de madera de cortas a hecho de Castilla y León, donde a menudo se obliga al rematante a eliminar los restos de la corta. La forma más habitual de eliminación es el triturado en monte con una desbrozadora de martillos. Si no son eliminados, entonces la Administración puede quedarse con toda o parte de la fianza. Si se traslada al balance unitario de biomasa el coste ahorrado por este concepto, se obtendría un valor por tonelada verde de biomasa entre 3 y 9 €, lo cual favorecería también los sistemas en que se extrae la biomasa que tradicionalmente se consideraba residual. La oscilación es grande, porque depende de la forma de calcular la parte de la fianza que se debe a este concepto, y depende también, en caso que la empresa de aprovechamientos asuma la eliminación de restos, de la tarifa de un tractor con una desbrozadora de martillos que se tome, que será a su vez función de la superficie del monte, la pendiente y el tamaño de los restos.

Otro aspecto que no contempla este análisis es el precio de la biomasa “en pie”, que no se ha considerado porque actualmente no se paga al propietario forestal, a diferencia de la madera que sí tiene un valor en pie. Para que no distorsionara la comparación, tampoco se ha introducido el precio de la madera de industria “en pie”.

Finalmente, otros costes no considerados son los costes fijos debidos, por ejemplo, al transporte de máquinas. Estos costes penalizarían los sistemas de aprovechamiento de biomasa, dado que requieren más máquinas, y esto sería más sensible en montes pequeños o muy pequeños, en que el balance se podría orientar a la producción de sólo madera de industria.

9. 9. Recomendaciones relativas a la calidad de la biomasa

Las principales normas orientadas a obtener una biomasa de mayor calidad son las siguientes:

- No arrastrar o incorporar tierra ni piedras con la biomasa. Esto es muy habitual en los aprovechamientos con motoserristas y *skidder*. En los mecanizados, se puede conseguir un material bastante limpio.
- Dejar secar biomasa y/o astillas para que el combustible llegue lo más seco posible a su destino, por el mayor poder calorífico. Ya se ha comentado la conveniencia de dejar secar la biomasa por razones ambientales, pero en muchos casos se procura un secado adicional de la biomasa en el cargadero, siempre que esto no suponga riesgos fitosanitarios o de incendios por encima de lo tolerable. En el caso de las frondosas, dejar secar los árboles aumenta su dureza, lo que conlleva mayor desgaste de cuchillas y mayor potencia necesaria –y consumo de combustible–. También se produce más polvo –mayor proporción de finos–, lo que no resulta positivo para la calidad del propio combustible ni tampoco desde el punto de vista ergonómico y ambiental. Hay que buscar un equilibrio, en función del equipo disponible, entre el mayor precio de la biomasa por su mayor poder calorífico por estéreo, y los problemas logísticos y operativos de trabajar con biomasa seca. Entre otros, para el uso adecuado de una astilladora, reduciendo los costes fijos, conviene recurrir a un programa de optimización del transporte en función de la posición de las pilas, el momento de su apeo y desembosque, la época del año y las características de la demanda.
- En función del destino, el contenido en álcalis y en cenizas en general puede ser perjudicial y dar lugar a rechazos o penalizaciones. En principio, a mayor calidad exigida para la biomasa, más conveniente será que no incluya hojas o, en su caso, acículas, para lo que es también conveniente que se seque en monte.

9.10. Resultado del análisis de astillas

El poder calorífico inferior en seco y a presión constante es de 4.609 para *Pinus pinaster* Ait. y 4.570 para *Pinus sylvestris* L., la humedad del material del primero era del 48 % y la del segundo del 38 % sobre peso fresco. La densidad energética de astillas de pino silvestre en seco sería de 5.3 MWh/t en seco. La densidad para el *P pinaster* Ait. sería algo más elevada 5,4. MWh/t en seco (*Tabla LXIII*).

El residuo después de la combustión es bajo, entre 1,8 y 1,2% sobre peso seco, respectivamente, es decir que por cada tonelada se generan entre 12 y 18 kg de ceniza, que habría que gestionar. Una central con un consumo de 50.000 toneladas secas anuales produciría entre 600 y 900 toneladas.

La humedad total inicial es elevada en el caso del pino resinero, solamente para las calderas de lecho fluidizado el material resultante sería válido, porque además admiten tamaños de hasta 5 cm e incluso superiores. Para el uso en calderas de parrilla móvil, habría que secar las astillas al aire, y para las de parrilla fija además habría que cribar las astillas supe-

El aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas a hecho de pinares de pino

riores a 3,8 cm. Para el resto de calderas (quemador ciclónico, lanzadera e inyector) haría falta secar el material de monte y además rebajar sus dimensiones.

	<i>P sylvestris</i>	<i>P pinaster</i>
	Seco	Seco
Volátiles (%)	81,5	80,2
Cenizas (%)	1,2	1,8
Carbono fijo (%) calculado		18
Carbono (%)	51,6	51,4
Hidrógeno (%)	4,1	6
Nitrógeno (%)	0,2	0,3
Cloro (%)		< 0,01
Azufre (%)	0,1	0
Oxígeno (%) (calculado)		40,5
Poder calorífico superior (Kcal/kg)	4.903,0	4.943
Poder calorífico inferior (PCI) v Kcal/kg)	4.570,3	4.627,5
Poder calorífico inferior PCI p (Kcal/kg)	4.551,3	4.609,5

Tabla LXIII: Características de las astillas.

9.11. Conclusiones y recomendaciones

9.11.1. Respecto a la planificación previa

(selección del lugar, localización del cargadero, etc.):

- Es importante cuantificar los restos de corta que resulten de un aprovechamiento maderero. En las experiencias estudiadas se han obtenido en torno a **160 kg por m³ de madera** y una densidad de biomasa en torno a las **70 t/ha**, no existiendo grandes diferencias entre las dos especies de pinos.
- **La proporción en peso entre fuste y ramas es muy próxima para ambas especies, el peso de las ramas y rabeón, para un diámetro en punta delgada de 7 cm, es alrededor de un 24% del peso del fuste.**
- Conforme aumenta el diámetro normal medio de la masa, aumenta la cantidad de biomasa, a igualdad de densidad. La relación biomasa aérea-diámetro normal del árbol es potencial y se han determinado los parámetros que la caracterizan.
- Es imprescindible la **coordinación de los trabajos de extracción de madera con el aprovechamiento de biomasa de sus residuos** para una rentabilidad potencial.
- La extracción de la biomasa requiere una evaluación del impacto en cuanto a erosión y pérdida de nutrientes fundamentalmente. **El riesgo de pérdida de nutrientes es mucho mayor en suelos muy ácidos de texturas gruesas.** Un mayor riesgo de erosión va ligado a una mayor pendiente y esto afecta a la mecanización.
- La mecanización facilita el aprovechamiento de biomasa y por ello hay que considerar la pendiente, pedregosidad y presencia de matorral. Con pendientes superiores al 30%, se desaconseja la mecanización.

- El transporte de biomasa bruta es aconsejable para distancias inferiores a 20 km con camión semirremolque cerrado; si ésta aumenta, entonces la mejor opción es el transporte de astilla con camión de piso móvil. Para ello se debe contar con una pala cargadora frontal y que la astilladora descargue en el suelo.

9.11.2. En cuanto al apeo, desramado y tronzado:

- En los aprovechamientos mecanizados, **se hace imprescindible que la cosechadora realice una labor de apilado de restos en cordones bien formados que no deben ser pisados por las máquinas**, de otra forma el aprovechamiento de biomasa sería inviable. **El rendimiento de la procesadora, cuando hace esta labor, desciende en un 20% respecto al sistema tradicional**, produciendo en torno a para un diámetro medio de 25 cm y un diámetro en punta delgada de 7 cm, 2,2 t de biomasa verde/hora y 12,8 m³ c/c por hora de madera.
- Según el análisis de costes, **la fracción de fuste entre 7 y 14 cm de diámetro, con destino habitual en la industria de trituración, podría ser derivada a un uso energético con un buen rendimiento económico**, dependiendo del precio de mercado que establezcan los distintos consumidores.
- **En caso de decidir destinar la fracción delgada a biomasa, la procesadora debería dejar las copas lo más enteras posibles, para facilitar la saca.**
- **En el aprovechamiento maderero con apeo manual y saca con *skidder*, se pueden hacer mejoras que faciliten el aprovechamiento de biomasa posterior:** planificación de las vías temporales de saca para minimizar el tránsito y el fraccionamiento de las ramas y apeo planificado para facilitar la saca. Otra opción a contemplar sería aumentar del diámetro en punta delgada de los fustes, dejando más fracción de biomasa.

9.11.3. En cuanto al desembosque:

- **Es más barato, según los precios horarios expuestos y los rendimientos obtenidos, que el autocargador saque los restos de corta a cargadero y una vez allí sean astillados (astillado fijo).** No obstante, el astillado móvil sobre cordones puede ejecutarse si estratégicamente ofreciera alguna ventaja.
- Las pinzas madereras no son las más **adecuadas para el manejo de restos de corta, unas pinzas tipo pulpo o, al menos, sin travesaños, serían más convenientes.**
- **El principal factor tecnológico que determina el rendimiento del desembosque es la capacidad volumétrica del remolque del autocargador. Teleros extensibles o remolques con paredes abatibles pueden incrementar la productividad de esta operación.**
- **El rendimiento de desembosque de restos agrupados en cordones fue de 10,2 t/h, con distancias de desembosque de 130 m. Cuando los restos no estaban agrupados, el rendimiento llegó a descender por debajo de 4 t/h.**
- La distancia de desembosque puede incrementar el coste de esta operación hasta en un 50 % si la distancia varía en 100 m.

9.11.4. En cuanto al astillado de biomasa de ramas y puntas:

- **El astillado en cargadero resulta más productivo que el astillado sobre cordones y material disperso**, un valor de referencia son los **12,6 t/h** obtenidos. En el caso de astillado en cargadero, **el factor tecnológico limitante es el tamaño de la bandeja de alimentación de la astilladora**, que si fuera más grande y con rodillos **aumentaría el rendimiento**.
- En el astillado en cargadero, **si los restos a astillar incluyen la fracción de madera tradicionalmente destinada a la industria de la trituración**, la **productividad aumenta hasta un 14 %**. Pero este aumento de rendimiento no se produce en restos agrupados en cordones.
- **El rendimiento de la astilladora trabajando en móvil sobre los cordones de biomasa fue de 8,3 t/h**. Este rendimiento bajaba a 4 t/h si los restos estaban dispersos.
- **En el astillado móvil, el posicionamiento de la máquina perpendicular al cordón es más productivo**, hasta un 7%, que si la máquina coloca paralelo su eje longitudinal al cordón, porque la grúa es más eficaz alimentando la astilladora.
- El cambio de cuchillas supuso el 4 % como promedio del tiempo productivo, sin embargo, en casos en los que además de ejecutar la eliminación de residuos, **se busca la calidad de la astilla**. Entonces, el tiempo empleado en **el cambio de cuchillas puede alcanzar el 17%**, reduciéndose el tiempo productivo a menos del 70 %.
- La operación de descarga puede hacer descender los rendimientos. **La opción más eficaz para la astilladora es la descarga en el suelo**. La descarga sobre camión es mucho más lenta y las condiciones de espacio y pendiente del cargadero deben ser muy buena, pendientes próxima a 0, espacios abiertos de más de 30 m de largo y 15 de ancho para las maniobras.

9.11.5. Respecto a la seguridad y salud:

Los operarios deben conocer las normas de seguridad y salud concernientes a su puesto de trabajo para garantizar la seguridad y salud y respetarlas. Además deben utilizar siempre y correctamente los EPI's preceptivos.

9.11.6. Respecto a la calidad de la astilla:

- La calidad de la biomasa (astillas) está relacionada con su granulometría relativamente fina y homogénea, con su humedad lo más reducida posible, con el mínimo porcentaje de impurezas no orgánicas –piedras, arena, piezas metálicas u otras– y con el menor contenido posible de cenizas, y particularmente de álcalis que dan lugar a problemas de sinterización en las calderas. En ese sentido, los consumidores más exigentes –pequeñas calderas de aplicaciones térmicas– requerirán astillas con la mayor proporción de madera y menor de corteza, ramillas y hojas, que sea posible. Estas circunstancias pueden condicionar fuertemente la forma de ejecución y la logística de los aprovechamientos.

- **Para obtener una mejor calidad de astilla, es preferible que los restos se astillen sin acículas**, ya que estas aumentan el contenido de cloro y azufre de la astilla, además del contenido en cenizas. Por lo tanto es preferible dejar un tiempo entre las operaciones de apeo y las de astillado.

9.11.7. En cuanto a los costes del aprovechamiento:

- **Los aprovechamientos con motosierra y skidder son incompatibles con un aprovechamiento de biomasa de costes próximos a 50 €/t.** Existen posibilidades para la mejora e integración de la biomasa en el aprovechamiento, pero los resultados obtenidos distan mucho de los obtenidos con el apeo mecanizado.
- **En el balance relativo de los sistemas de aprovechamiento integrados y mecanizados** y para unos precios de mercado teóricos de 34 €/t de troza puesta en la fábrica de trituración (pasta de papel o tableros) y 42 €/t de astilla en verde puesta también en central, **el sistema de aprovechamiento con mejor resultado sería la saca y astillado fijo (en cargadero) de ramas y rabeón, junto con la fracción de madera entre 7 y 14 cm de diámetro, con destino energético.**

Después, los mejores resultados del balance serían para los dos sistemas de aprovechamiento combinado, por un lado se sacaría la madera de industria y por otro la biomasa, mejor si el astillado de ésta se produce en cargadero, algo peor si se produce de forma móvil, en los cordones. Después de estos sistemas en términos de rentabilidad por hectárea, estaría el aprovechamiento tradicional de madera de industria, sin extracción de biomasa alguna.

Este balance se podría ver alterado a favor de la biomasa, si se tiene en cuenta el ahorro de costes de eliminación de residuos, y a favor del aprovechamiento tradicional de madera de industria, especialmente en montes pequeños, si se tienen en cuenta los costes fijos debidos al transporte de nuevas máquinas cuando se lleva a cabo el astillado.

OTRAS EXPERIENCIAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL EN TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS SOBRE PINARES Y EN PODAS ENCINARES

10.1. Aprovechamiento de biomasa en tratamientos selvícolas sobre pinares

10.1.1. Localización

Los trabajos de trituración se han llevado a cabo en la finca Abadía de Retuerta, sita en el Término Municipal de Sardón de Duero, en la provincia de Valladolid.

Esta finca tiene una superficie de 324,21 ha de las que 227,30 están destinadas al aprovechamiento vitivinícola y en el resto, existe una zona de ribera (chopos, sauces, zarzas,...) y un encinar de páramos con presencia de *Pinus pinea* L. En el pinar el sotobosque es ralo, con presencia de *Cistus ladanifer* y *Asparagus* sp.

En la zona de estudio se han llevado a cabo los trabajos selvícolas de clara del pinar y desbroce de matorral. Los fustes de los pinos se han destinado a madera de trituración y las ramas y raberones, junto con el matorral desbrozado, se dejaron en monte para su posterior acopio y trituración.

La zona de estudio consiste en dos recintos de la finca de 18,12 y 4,86 ha (*Tabla XLIV*) con la localización en el SIGPAC que se presenta en la *Figura 257*.

Provincia	47- VALLADOLID	
Municipio	158- SARDÓN DE DUERO	
Agregado	0	
Zona	0	
Polígono	2	
Parcela	80004	
Recintos	2	5
Superficie (ha)	18,12	4,86

Tabla XLIV: Superficie de las parcelas.



Figura 257: Localización en SigPac de las parcelas tratadas.

10.1.2. Inventario

Dado que se asistió al trabajo ya realizado, no se pudo valorar la densidad inicial ni los tiempos o rendimientos empleados en la ejecución de los trabajos selvícolas. Sin embargo, a través del inventario posterior, fue posible caracterizar la masa antes de la intervención como una masa forestal mixta con dominio de pino piñonero y presencia secundaria de encina, con una presencia no mayor del 10 % de los pies totales.

El espaciamiento inicial estimado era de unos 3 ó 4 m, con una densidad entre 600 y 800 pies/ha, mientras que la densidad final fue de 268 pies/ha, con un diámetro cuadrático medio de 38 cm.

La distribución diamétrica final estimada a partir de dos parcelas circulares de muestreo de radio 15 m después de los trabajos, ha sido la que se refleja en la *Figura 258*, a la que corresponde el citado diámetro medio.

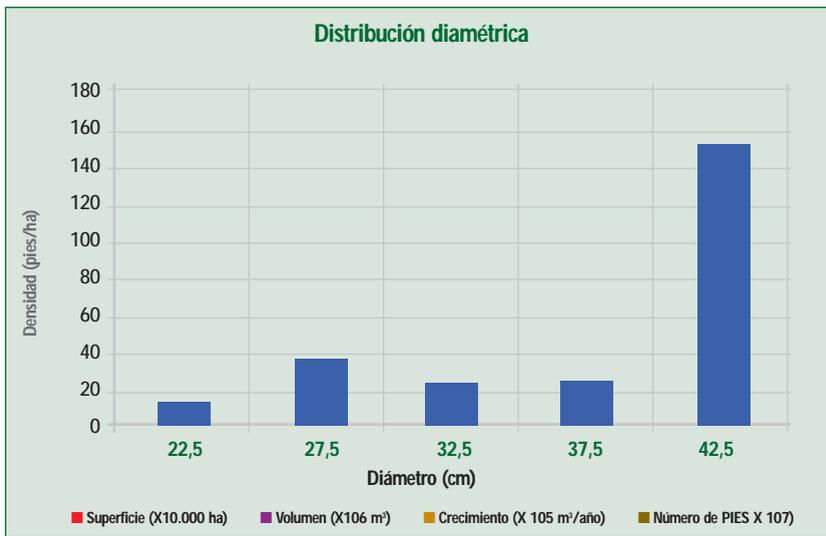


Figura 258: Distribución diamétrica final estimada.

Además del clareo y limpia, se realizó una poda, que de acuerdo con la Asociación de Propietarios que dirigió los trabajos selvícolas, ascendió desde 1,5 m hasta 3,5 ó 4 m de altura, siempre dejando al menos 1/3 de copa viva.

La encina tenía una presencia poco relevantes y se resalveó, dejando algún pie disperso.

A partir de las pesadas de los camiones del material triturado, se ha calculado una densidad de restos de 37,5 t/ha, cantidad sensiblemente mayor a las 30 t/ha estimadas por la citada Asociación de Propietarios.

10.1.3. Aprovechamiento de biomasa después de los trabajos selvícolas

10.1.3.1. Maquinaria empleada para la recogida y triturado

Los trabajos de recolección, alimentación de trituradora y evacuación de la biomasa procesada fueron ejecutados por el siguiente equipo: dos camiones volquete, dos cargadoras

Otras experiencias de aprovechamiento de biomasa forestal

Volvo y una trituradora Doppstad AK430, propiedad de Ramafosa (empresa forestal de suministro ligada con el grupo de tableros de Tafisa).

A la hora de comenzar el trabajo, los restos de poda se encontraban agrupados en montones dispersos a lo largo de las dos parcelas. Una de las palas cargadoras, la de menor potencia (Volvo L50), iba recogiendo la biomasa de estos montones y cargándola en los camiones que las llevaban a un cargadero donde trabajaría la trituradora, alimentada por la otra cargadora (Volvo L70).

El sistema de trabajo de los camiones volquete era el siguiente: eran cargados por la cargadora, se desplazaban a cargadero, vaciaban la carga y volvían al lugar donde se encontraba la pala cargadora para ser cargados de nuevo, como se observa en las Figuras 259, 260 y 261. Mientras uno de los camiones era cargado, el otro hacía el viaje para descargar, procurando que existiesen las menores esperas posibles.



Figuras 259,260 y261: Trabajo de acopio de la pala cargadora Volvo BML50 y los camiones volquete.

En el cargadero, se encontraba la trituradora que era alimentada por otra cargadora con una pinza acoplada para recoger los restos (Figuras 262 y 263).



Figuras 262 y 263: Alimentación de la trituradora Doppstadt AK 430 con la cargadora BML 70.

10.1.3.2. Organización de los trabajos

En un principio, se planteó un sistema de trabajo en el que la trituradora fuese triturando los montones tal cual se encontraban, pero al remolcar la trituradora dentro de la masa, quedaba frecuentemente atrapada debido a su gran peso y a la escasa capacidad portante del suelo, y resultaba enormemente trabajoso conseguir moverla.

Por este motivo se optó por un triturado fijo en una zona despejada próxima a la pista, con la incorporación de los camiones y la pala para agrupar la biomasa en el lugar de trabajo de la trituradora.

En ese cargadero se ha cronometrado durante dos jornadas completas, durante las cuales se recogieron los restos de la parte de 4,86 ha y algunos viajes de la parte de 8 ha.

10.1.3.2.1. Descripción de los trabajos de trituración

La cargadora volvo L70 de 130 CV estaba implementada con una grapa con la que cargaba los restos de las podas y clareos y los depositaba en la alimentación vertical de la trituradora. Esta cargadora, además de alimentar a la trituradora, iba moviendo la biomasa ya triturada para no colapsar la cinta de expulsión del material triturado (*Figura 265*), y cargaba los camiones que transportaron el material triturado al centro de consumo (*Figura 264*). Para llevar a cabo estas actividades, el operario debía cambiar el apero de la máquina, quitando la grapa y poniendo en su lugar un cazo (*Figura 266*).



Figura 264: Cargadora llenando la caja de un camión de piso móvil.



Figura 265: Cargadora retirando la biomasa triturada de la zona de desahogo de la cinta transportadora de la trituradora.



Figura 266: Cambio de apero.

Según el operario de la trituradora, estas actividades complementarias normalmente las llevaba a cabo un operario adicional, de manera que la alimentación de la trituradora no fuera interrumpida en la medida de lo posible; por lo tanto, el rendimiento que se ha obtenido en este estudio puede verse sensiblemente aumentado en caso de que este sistema de trabajo disponga de dos operarios.

La distribución de tiempos y el rendimiento de la cargadora y la trituradora durante el tiempo cronometrado viene representada en la *Tabla LXV*.

		Tiempo (%)		Productividad (t/hora)			
Tiempo productivo	Desplazamiento vacío a por carga	16,0	90,7	95,0	13,2	12,6	Tiempo de presencia
	Alimentación	40,3					
	Apoyo alimentación	9,4					
	Colocación montón en el suelo	5,1					
	Mueve astillas	12,0					
	Carga camión	2,6					
	Montón astillas con pala	5,4					
Tiempo trabajo indirecto	Calentamiento inicial	2,6	4,3				12,0
	Cambio apero	1,2					
	Repostado	0,5					
Tiempo no operativo	Interrupción visita, necesidades	2,6	5,0	5,0			
	Interrupción en espera otros elementos	2,4					
Total		100,0	100,0	100,0			

Tabla LXV: Tabla acorde con el estándar IUFRO con la distribución de tiempos y rendimientos de la pala cargadora y la trituradora.

La productividad de la cargadora volvo L70 con grapa alimentando una trituradora Doppstadt AK430 fue de 13,2 t/h sobre tiempo productivo. En este tiempo están incluidas las operaciones de carga de un camión de astillas (25 minutos) y la colocación del montón de astillas con la pala cargadora (40 minutos). Si estas dos operaciones no se contabilizaran, el rendimiento alcanzaría los 15,4 t/h.

El índice de triturado, es decir el porcentaje de tiempo que la Doppstadt estaba triturando frente al tiempo productivo total de las dos máquinas, fue del 47 %. Por tanto, el 53% del tiempo productivo la trituradora estaba esperando a ser alimentada o bien necesitaba que se presionaran los restos hacía los rodillos de alimentación. Debido a que el material era poco pesado y voluminoso, enredándose en las paredes de la bandeja de alimentación, era necesario que la cargadora los empujara. Esta operación supuso casi el 10% del tiempo de trabajo de la cargadora. Una posible mejora tecnológica de la máquina trituradora sería **un sistema de empuje semiautomático que forzase la circulación de biomasa bruta**.

La carga de camiones del material triturado también se ejecutó con dicha máquina, cambiando el apero de tipo grapa por una pala. Durante los 25 minutos de carga, la tritu-

radadora estaba parada. Centrado el análisis en una jornada y con la productividad observada, se producirían 3 camiones de triturado por jornada y para cargar esos 3 camiones serían necesarios 75 minutos, tiempo en que la trituradora estaría en espera. Tener otra máquina y otro maquinista, para evitar que la máquina trituradora esperase, supondría un coste mínimo de 35 €/h, coste que se aplicaría a toda la jornada, a pesar de que el tractor adicional y su maquinista estarían parados el 82% del tiempo de presencia, es decir, supondría 197 € más de costes por jornada. Por otro lado, el coste horario de una máquina trituradora de las características estudiadas es de 110 €/h, por tanto el 18 % de tiempo de espera sobre el tiempo de trabajo total (los citados 75 minutos) supondrían una “pérdida” de 159 € por jornada. Por lo tanto, la necesidad de un operario adicional con otra pala cargadora sería dudosa.

La humedad sobre base húmeda del material procesado fue del 36 %. Esta humedad es bastante baja si la comparamos con experiencias similares de astillado de restos en cortas a hecho, o de árboles enteros en el caso de las claras, donde la humedad del material triturado varía entre el 38 y el 55 %. La humedad del material variará en función de la época del año en que se realicen los trabajos, el tiempo que se dejen secar los restos desde que se corta hasta que se astilla y lo grueso que sea el material a triturar. En general, al cabo de cierto tiempo de secado al aire, las fracciones de ramas con mayores diámetros y el fuste tienen un mayor contenido en humedad que los ramillos y las acículas.

El consumo de gasoil por parte de la trituradora estuvo en torno a 32 litros/hora, y el de la cargadora a 7,5 l a la hora. El balance energético, teniendo en cuenta el consumo de combustibles fósiles y suponiendo 2.100 kcal/kg de biomasa fresca, es de 29 MWh, es decir el consumo de energía fósil es 0,16 % de la energía producida, sin contar el transporte a la central y la energía de producción y mantenimiento de la maquinaria empleada.

10.1.3.2.2. Descripción de los trabajos de acopio del material

La máquina Volvo L50 iba cargando sucesivamente dos camiones volquetes con los restos del klareo y poda que ya se encontraban apilados. Los camiones transportaban los restos a cargaderos principales, donde la trituradora los procesaba. Según la distancia y las dificultades de maniobra de los camiones, eran la cargadora o los camiones los que tenían que esperar al otro elemento del sistema.

Del análisis de tiempos del ciclo productivo de la pala cargando los remolques de los camiones volquete, se ha obtenido la distribución que refleja la *Figura 267*.

El 19 % del tiempo de trabajo la cargadora tuvo que esperar a que los camiones volquetes se colocaran para ser cargados. Un pequeño tiempo fue dedicado al desplazamiento, puesto que los montones estaban muy próximos, a menos de 100 m, y la mayor parte del tiempo de trabajo fue destinado a la carga.

El rendimiento de la máquina cargando fue de 18 t/h de tiempo de trabajo.

El porcentaje de distribución de tiempos obtenido del cronometraje de los camiones volquete se refleja en la *Figura 268*. El rendimiento de cada camión fue de 5,20 t/h sobre tiempo de trabajo. Así que considerando los dos camiones trabajando a la vez, el rendimiento conjunto del transporte de restos fue de 10,40 t/h.

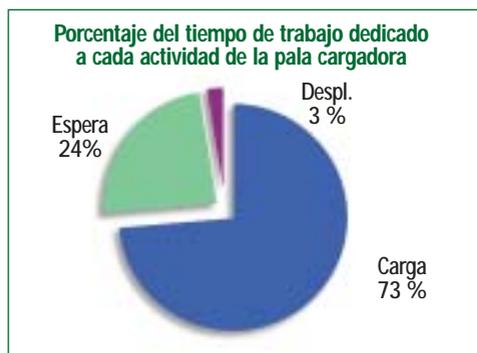


Figura 267: Distribución de tiempos de la pala cargadora L50 en los trabajos de reunión de biomasa bruta.



Figura 268: Distribución de tiempos de los camiones volquetes en los trabajos de reunión de biomasa bruta.

10.1.4. Costes del acopio y trituración de biomasa

En este apartado, los costes que se presentan en la *Tabla LXVI* son los de las operaciones de reorganización de restos de poda y clareo en cargaderos a pie de pista y la trituración de los mismos.

	Rendimiento (t verde/hora)	Coste horario (€/h)	Coste unitario (€/t verde)
Trituradora+Pala Cargadora	13	165	12,7
Pala cargadora+2 camiones volquetes	12	175	14,6
TOTAL			27,3

Tabla LXVI: Costes unitarios.

El material resultante procesado se llevó en camión de piso móvil a Valladolid, es decir a una distancia de 30 km aproximadamente, lo que supuso un coste de 4 €/t. Por tanto el coste total de las operaciones descritas asciende a 31,3 €/t verde.

Si se contabilizan los costes de estructura y los costes indirectos (15%) e incluyendo además un 12% de beneficios empresariales, pero sin incluir el coste del trabajo selvícola ni estimar un hipotético precio de la materia prima fijado por la propiedad y un emergente mercado, **el coste total por tonelada de biomasa procesada en verde puesta en parque de fábrica o central energética sería de 40,3 €/t.**

10.1.5. Conclusiones y recomendaciones

10.1.5.1. Sobre las existencias y las condiciones del terreno

- La cantidad de biomasa que resulta de un trabajo selvícola sobre un Pinar de *Pinus pinea* con mezcla de quercíneas, **sin contar la fracción extraída de madera con destino en la industria** de trituración, está en torno a **37,5 t/ha** (en verde). Esta cantidad está lejos de las magnitudes que se manejan en otro tipo de trabajos donde el aprovechamiento de biomasa es rentable (por ejemplo, en una clara de pino silvestre se pueden alcanzar las 100 t/ha).

- **La capacidad portante de un sustrato arenoso no es suficiente para la circulación de una trituradora Doppstadt AK430. Esto obliga a una reunión en pocos cargaderos próximos a pista.** Esta reunión se debe planificar desde el principio de los trabajos.

10.1.5.2. Sobre la saca de la biomasa bruta

- El monte tenía un acceso muy cómodo, con escasa pedregosidad y matorral. El espaciamiento final entre pies era amplio. Sin embargo, la imposibilidad de desplazamiento dentro del monte de la máquina AK430 ha supuesto una **reorganización de los montones de restos en cargaderos cercanos a pista un coste de 14,6 €/t verde.**
- Durante la reorganización de restos **hubo tiempos de espera debido a las difíciles condiciones de maniobrabilidad dentro de la masa para los camiones volquetes.** A pesar de tener suficiente capacidad de movimiento, las dimensiones de los mismos impedían una aproximación óptima a la cargadora. **Existen alternativas más flexibles con mayor capacidad de giro y menores dimensiones para desplazarse dentro de la masa, como tractores agrícolas con remolque basculante o tractores autocargadores.**
- La cargadora frontal mostró buena capacidad de trabajo, tanto por adherencia como por maniobrabilidad, y tanto para el manejo de biomasa bruta como para la carga de camiones.

10.1.5.3. Sobre el procesado de la biomasa

- El rendimiento alcanzado por la trituradora fue ligeramente mayor que el equipo de dos camiones volquetes y la grapa cargadora. La trituración alcanzó rendimientos sobre tiempo de trabajo de 13 t/h y la reunión de 12 t/h. Por tanto, los equipos de trabajo empleados estaban bastante equilibrados.
- El tipo de restos voluminosos, irregulares y de baja densidad, y la forma de alimentación de la trituradora supusieron que la máquina triturase el 55% del tiempo de trabajo productivo directo del conjunto de ambas máquinas, a pesar de que la forma de alimentación de la máquina permitía a la cargadora dejar la biomasa bruta sobre la bandeja de alimentación y ejecutar otras operaciones mientras se procesaba biomasa.
- La trituradora AK430 tiene una bandeja de alimentación amplia y de carga vertical, más adecuada que la lateral para este tipo de biomasa bruta. Sin embargo, un sistema de empuje adicional (un émbolo móvil por ejemplo) podría incrementar los rendimientos de procesado de este tipo de biomasa ligera y muy fraccionada.
- El equipo de una cargadora y una trituradora está bien dimensionado. Aunque la trituradora tiene un rendimiento mayor que la pala cargadora, por el tiempo invertido en las tareas de carga de camiones no se justifica, tras evaluar los costes, la introducción de otra máquina cargadora.
- La posibilidad de emplear dos aperos de trabajo, la pala y la grapa, para operar con dos tipos de materiales, biomasa bruta y biomasa procesada, con un cambio flexible y rápido que el mismo conductor puede realizar en cinco minutos, dota al equipo de polivalencia, disminuyendo costes.
- Para evitar la autocombustión del material una vez triturado (que generalmente se debe a

un excesivo tamaño de los montones) se recomienda hacer montones que no superen los 40 ó 50 metros cúbicos de astilla si se van a dejar durante cierto tiempo en el cargadero.

10.1.5.4. Sobre la seguridad y salud en los trabajos de trituración y acopio

- Los trabajadores deben cumplir con las medidas de seguridad y salud necesarias (veáse el Capítulo sobre Seguridad y Salud del presente Manual Técnico), y con especial atención:
 - Llevar equipos de protección individual (protectores auditivos, pantallas de protección facial contra proyecciones, etc.).
 - Tener un extintor en la máquina, sobre todo en época de alto riesgo de incendios.

10.1.5.5. Sobre el coste de la biomasa procesada

- En el presente informe **se ha justificado el coste de una reorganización de restos, procesado en monte y transporte a fábrica a 30 km en camión de piso móvil de 40.3 €/t verde**. Este es el coste necesario, incluyendo el beneficio empresarial y costes indirectos y de estructura, para complementar un trabajo selvícola con una extracción de biomasa con un valor para un mercado emergente.
- La **humedad del material estudiado, 36% sobre base húmeda, es baja** en comparación con biomasa procedente de copas de otras especies forestales y otras épocas del año, por ejemplo las astillas de pino silvestre recogidas en Pinar Grande (Soria) en octubre alcanzan el 60% de humedad sobre peso húmedo. **Si se pasa a un valor que se puede considerar medio, 45% de humedad en base húmeda, el coste por tonelada se reduciría a 34,63 €/t verde**. A pesar de ser una cifra reducida en comparación con las de otras experiencias, hay que destacar que **es un material relativamente sucio y no muy fino ni homogéneo, por lo que ciertos clientes podrían requerir un post-procesado**.
- Un aprovechamiento rentable de biomasa debe reunir la cantidad total suficiente de materia prima que rentabilice los desplazamientos, en Portugal lo fijan en 500 t. Además debe existir un densidad de biomasa a extraer superior a las 50 t/ha. En este caso, la cantidad total fue de menos de 400 t y la densidad menor; sin embargo, la proximidad al centro de consumo y la necesidad de procesar la biomasa bruta dentro de los trabajos selvícolas programados justifica el desplazamiento de la maquinaria.

10.2. Aprovechamiento de biomasa de leñas de poda y/o retazo de podas de masas adeshadas de encina

10.2.1. Introducción

Este apartado es el resultado del proceso por el personal de la U.P.M. de los datos que se obtuvieron como resultado de la *“Asistencia técnica para el análisis de rendimientos en la obtención de biomasa procedente de tratamientos selvícolas en encinares de Salamanca”*

durante los trabajos llevados a cabo con motivo del proyecto “*Plan de Bioenergía en Castilla y León: recogida y trituración de restos procedentes de tratamientos selvícolas en encinares de la comarca de Ciudad Rodrigo (Salamanca)*”, promovido por la Delegación Territorial de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León en Salamanca, y ejecutado por la empresa TRAGSA.

En la citada Asistencia Técnica se llevó a cabo, bajo la tutela técnica de la Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.), el control de rendimientos, costes y planificación operativa de los trabajos de poda, preparación de leñas, acopio y astillado en que consistieron los trabajos, encuadrándose los resultados que se reflejan en este capítulo 10.2 en un contrato entre CESEFOR y la U.P.M., cuyo objeto fue únicamente el procesado de los datos que tiene por resultado el presente apartado del Manual Técnico.

Por tanto, el proceso y elaboración de los datos que se reflejan a continuación fueron promovidos y financiados por CESEFOR (Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León) y llevados a cabo por el equipo redactor del presente Manual, de la U.P.M. Se expone a continuación de forma detallada la naturaleza de los trabajos objeto de seguimiento.

10.2.1.1. Olivo y desmoche

Las dehesas salmantinas son sometidas periódicamente a **podas de formación (desmoches) y de fructificación (olivados)**.

Las **podas de formación (desmoches)** buscan la obtención de una ramificación equilibrada, y aplanar y extender la copa, con el fin de abaratar la poda, mejorar la producción de bellota, etc. La poda de formación va encaminada a la consecución de las ramas principales o brazos que conformarán la estructura soporte de las restantes ramas de la copa.

También recibe el nombre de desmoche las podas de producción de leñas. Esta es una poda dura para el árbol, en la que se pretende obtener más leña y más gruesa. El árbol y la fructificación salen perjudicados con respecto a la poda de mantenimiento y, con demasiada frecuencia, con respecto a si se dejara de podar.

Esta última poda sólo es justificable cuando la producción de bellota interesa menos que la producción de leña, o porque los costes de la poda de mantenimiento obliguen a espaciar en el tiempo y a efectuar una poda más dura para compensar gastos.

En general, los desmoches dan lugar a un material leñoso heterogéneo: de diámetros que pueden alcanzar los 30 cm y ramas más finas de menos de 5 cm de diámetro. El material de mayores dimensiones se ha aprovechado tradicionalmente como **leña** y actualmente se sigue recogiendo y procesando para su venta, mientras que la fracción más fina se denomina **retazo**.

Las **podas de fructificación (olivados)** dan lugar a un material leñoso que por lo general no sobrepasa los 10 cm de diámetro, también denominado **retazo**. El retazo no tiene un aprovechamiento tan intenso como las leñas y eso da lugar que a veces se acordone y abandone o incluso se queme en el propio monte.

Esta intervención se caracteriza por su moderación, tanto en cuantía como en grosor de ramas cortadas (no mayores en su mayoría de 4 o 5 cm de diámetro). Va dirigida a incrementar la producción de bellotas. Es la más beneficiosa para la fructificación y se obtiene ramón, pero la leña que se extrae no suele compensar los gastos de poda.

El **primer olivo** debe aplicarse tras la formación del árbol y cuando éste tiene edad y tamaño para producir bellota adecuadamente, es decir a partir de unos 50 años (o, aproximadamente, 75 cm de circunferencia a 1,30 metros del suelo). Las ramas que queden en el árbol deben poseer suficiente grosor para evitar que se tronchen por acción del viento y de la nieve. En el **segundo olivo** y sucesivos, deben cortarse las ramas viejas y las puntas secas, situadas en los extremos de los brazos.

Las sucesivas podas deben realizarse con periodicidad de 6 a 12 años, pasada la crisis de la anterior poda, cuando el árbol vuelve a tener una buena capacidad de cicatrización. Retrasar en exceso las podas permite engrosar excesivamente el ramaje que debería ser cortado, y que acaba por deformar definitivamente el porte del árbol (como sucede a menudo en el caso de las podas con objeto exclusivo de producción de leñas).

El **desmoche** debe realizarse antes de que las ramas adquieran gran grosor, lo más tarde a los 20 años después de haber hecho el primer olivo. En el desmoche deben dejarse en cada encina de 4 a 6 brazos (dependiendo de las características del árbol, la densidad de la masa, la calidad de estación...), con ramas terminales limpias, lo más nuevas posible y con tendencia horizontal, y cuyos extremos posean suficiente ramón para realizar eficazmente la fotosíntesis.

10.2.2. Localización y descripción de las masas estudiadas

10.2.2.1. Localización de las masas

El lugar escogido por el Servicio Territorial de Medio Ambiente para la realización de los ensayos de extracción y recogida de biomasa fue el monte “Sierra de Camaces”, cuyas características legales más significativas se reflejan en la *Tabla LXVII*.

Dado que existe coincidencia territorial del presente proyecto con alguno de los lugares de la Red Natura 2000, para avalar la compatibilidad del proyecto con los valores que han justificado su declaración, así como para garantizar que las medidas adoptadas no comprometen la singularidad del espacio, los trabajos se han realizado fuera de la época de nidificación de las especies silvestres presentes en el monte.

Nº de C.U.P.	120
Elenco	1009 y 3029 (parcial)
Superficie	1.161,5 ha
Nombre	Sierra de Capaces
Término Municipal	Ciudad Rodrigo
Comarca	Ciudad Rodrigo
Pertenencia	C.C.A.A. de Castilla y León
Superficie de tratamiento	56 ha
Observaciones	Pertenece al LIC (Lugar de Interés Comunitario) Campo de Argañán.

Tabla LXVII: Localización de la masa objeto de estudio.

El monte objeto de estudio es una dehesa y se eligió porque *a priori* reunía las características fisiográficas adecuadas para favorecer la rentabilidad de los aprovechamientos de

biomasa (pendiente nula o escasa, baja pedregosidad, pistas forestales colindantes de buena transitabilidad, etc...)

Se trató de encontrar zonas que representaran la estructura típica de la dehesa de Salamanca donde se fueran a realizar los tratamientos selvícolas propios de la poda con el fin de poder extrapolar los resultados a otras masas similares. Sin embargo, una parte del monte de Camaces no responde a la estructura típica de la dehesa salmantina, puesto que la masa se encuentra mezclada con pino, aunque es también una estructura que se presenta con cierta frecuencia en zonas forestales de Ávila, Zamora o Salamanca.

También se han estudiado los trabajos realizados en otra masa típica de dehesa salmantina correspondiente al monte de Tenebrón (monte 44 del C.U.P. de la provincia de Salamanca) en la que se llevaron a cabo los mismos trabajos de poda que en el monte Camaces. Se optó por hacer un control de rendimientos en este segundo monte para comparar métodos de trabajo distintos, como se explicará más adelante.

10.2.2.2. Caracterización de las masas

A partir del inventario previo a los trabajos selvícolas llevado a cabo por Tragsa en 2007, se han diferenciado distintos estratos según las características de la masa (distribución diamétrica, número de pies a podar...), los trabajos que se tenían que realizar y el aprovechamiento de leña de poda y/o sólo retazo producidos el año en curso o el anterior.

Para ello se muestrearon un serie de parcelas cuadradas de 30 x 30 m en cada monte. En ellas se identificó cada pie con el tipo de poda correspondiente (de fructificación o de formación). Los pies se clasificaron por tamaños en tres categorías (pequeños, medianos y grandes), según la *Tabla LXVIII*, y con los resultados que se muestran en la *tabla LXIX*.

Tipo	Perímetro medio (m)	Díámetro medio (cm)	Clase		Perímetro (m)
01	1,05	33,5	1	pequeñas	< 1,15
02	1,31	41,6	2	medianas	1,15 - 1,7
03	2,13	67,9	3	grandes	> 1,7
d1	0,90	28,6			
d2	1,41	45,0	o	olivado o poda de fructificación	
d3	2,39	76,2	d	desmoche o poda de formación	

Tabla LXVIII: Clases perimétricas y tipos de poda considerados.

Estr.	Sup (ha)	Parcelas	Olivo			Desmoche			Total
			01	02	03	d1	d2	d3	
I	18,8	4	17	25	14	19	39	14	128
II	15,34	3	19	33	4	15	26	4	100
III	10,55	2	22	44	22	6	22	6	122
IV	13,7	3	19	33	4	15	26	4	100
V	42,51	12	9	11	9	3	11	9	51

Tabla LXIX: Resultados del inventario dasométrico.

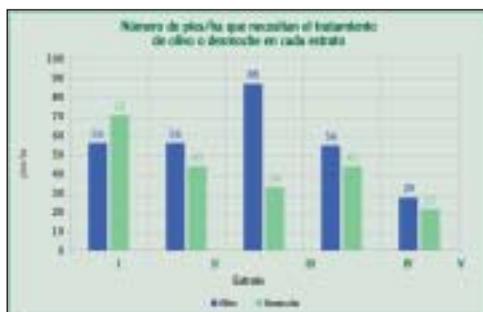
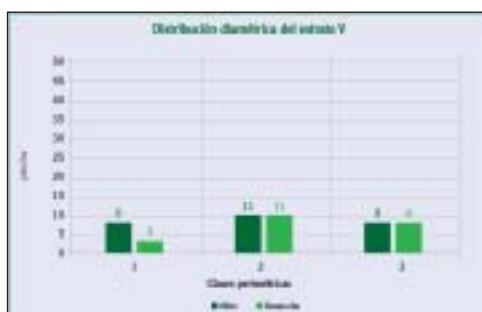
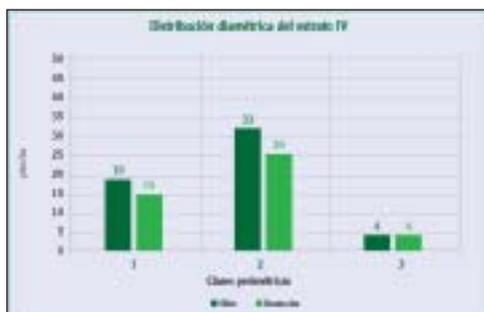
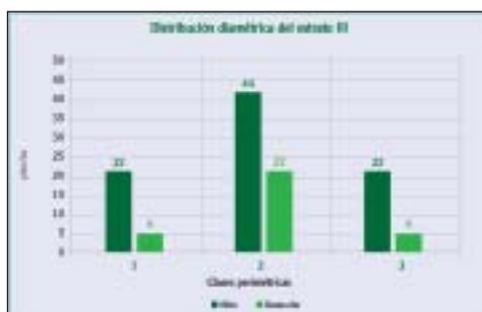
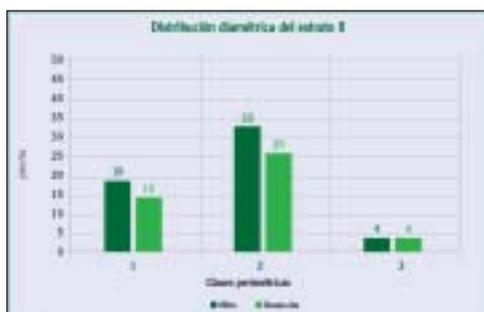


Figura 269: Resultados del inventario dasométrico.

En las Figuras 270 a 274 se muestra la distribución perimétrica de cada estrato diferenciando si el tratamiento que se va a hacer a los árboles es de olivo o desmoche.



Figuras 270 a 274: Distribución de las clases perimétricas de cada estrato en función del tratamiento; olivo y desmoche.

En la Tabla LXX se muestran de forma resumida las principales características de cada estrato. Los trabajos que se llevaron a cabo en cada estrato se muestran en la tabla LXXI.

Estrato	Monte	Características
I	Camaces	Masa mixta de encina mezclada con pino
		Masa madura bastante densa con predominio de desmoche frente a olivado
II	Camaces	Masa pura de encina.
		Masa menos densa y menos envejecida que la del estrato anterior.
		Predominio de olivado frente a desmoche
III	Camaces	Masa pura de encina
		Masa bastante densa con importante predominio de olivado frente a desmoche
IV	Camaces	Masa mixta de encina mezclada con pino.
		Masa poco envejecida y algo menos densa, con predominio de olivo frente a desmoche.
V	Tenebrón	Estructura adehesada típica.
		Poco densa, con distribución diamétrica y de tipos de poda necesarios más equilibrada.

Tabla LXX: Características básicas que justifican la estratificación de las masas objeto de estudio.

Estrato	Monte	Trabajos realizados
I	Camaces	Retazo podado el año anterior (2007), en cordones.
		Leña ya retirada... Recogida y trituración sólo de la fracción correspondiente a olivado.
II	Camaces	Idem estrato I.
III	Camaces	Podado en el año (2008).
		Podado por pareja de podadores.
		Recogida de leña y retazo.
IV	Camaces	Podado en el año (2008).
		Podado por pareja de podadores.
		Recogida sólo del retazo
V	Tenebrón	Podado en el año (2008).
		Podado por operario autónomo.
		Recogida sólo del retazo

Tabla LXXI: Trabajos llevados a cabo en cada estrato.

10.2.3. Medición de biomasa

10.2.3.1. Pesado de biomasa y obtención de tablas de peso

Para estimar la biomasa resultante de la poda, se llevó a cabo un inventario por parte de operarios de Tragsa antes de que comenzasen los trabajos de poda. En este inventario de biomasa se pesó el retazo de 30 árboles; 15 de desmoche y 15 de olivo, que abarcaban un rango diamétrico de 25 a 101 cm. Los resultados de estas mediciones son los que refleja la Tabla LXXII, en peso verde para una humedad en torno al 30% que es la que correspondió al retazo recién cortado.

En la poda de formación, además del retazo se obtienen leñas, que normalmente son aprovechadas por los propios vecinos. Puesto que durante el primer inventario no se pesaron

Perímetro (m)	Diámetro (cm)	Subtipo	Diámetro copa (m)	Peso retazo (kg)
0,9	28,7	01	10,5	82
1	31,8	01	5,65	105
1,12	35,7	01	7,1	74
1,12	35,7	01	7,05	87
1,13	36,0	01	5,4	132
1,16	36,9	02	7,25	95
1,2	38,2	02	6,3	184
1,33	42,4	02	6,35	108
1,4	44,6	02	8,3	154
1,45	46,2	02	8,25	185
1,83	58,3	03	7,05	131
2	63,7	03	9,1	339
2,03	64,6	03	10,8	146
2,3	73,2	03	10,2	284
2,5	79,6	03	10,1	335
0,75	23,9	d1	5,15	69
0,8	25,5	d1	4,85	68
0,9	28,7	d1	5,8	85
0,95	30,3	d1	8	106
1,1	35,0	d1	5,95	100
1,2	38,2	d2	7,2	184
1,22	38,9	d2	9,3	279
1,5	47,8	d2	7,05	140
1,55	49,4	d2	9,25	254
1,6	51,0	d2	8,4	277
1,8	57,3	d3	10,5	441
1,9	60,5	d3	12,5	355
2,37	75,5	d3	12,25	702
2,7	86,0	d3	13,25	1047

Tabla LXXII: Resultado de los pesajes de biomasa para elaborar tablas de peso.

las leñas, se pesaron posteriormente las leñas de una serie de árboles para poder estimar cuánta biomasa más se obtendría si la leña se aprovechara junto con el retazo. Los resultados de las pesadas de leña se muestran en la *Tabla LXXIII*.

Por otra parte, se tomaron muestras tanto de retazo como de leña en estos inventarios, para la medición de su humedad en laboratorio que permitiera extender las estimaciones de peso fresco a peso seco.

Los resultados medios obtenidos de todas las muestras tomadas expresados como porcentaje de humedad son los que aparecen en la siguiente *Tabla LXXIV*:

Con los datos de inventario se han ajustado las ecuaciones mostradas en la *Tabla LXXV*:

Por medio de las mismas, se ha elaborado las siguientes tablas de pesos (*Tabla LXXVI* y *LXXVII*) para estimar el peso en función del diámetro de manera directa.

Perímetro (m)	Diámetro (cm)	Subtipo	Peso leñas (kg)
0,86	27,4	d1	86,765
1,01	32,1	d1	161,765
1,04	33,1	d1	166,765
1,05	33,4	d1	155,765
1,08	34,4	d1	266,765
1,12	35,7	d1	175,265
1,13	36,0	d1	138,915
1,17	37,2	d2	236,765
1,18	37,6	d2	419,265
1,18	37,6	d2	309,765
1,3	41,4	d2	332,265
1,52	48,4	d2	291,915
1,53	48,7	d2	219,765
1,6	50,9	d3	722,7675
1,65	52,5	d3	415,765

Tabla LXXIII: Resultados de los pesajes de leña.

	% Humedad sobre peso seco
Retazo sólo anterior	20,5
Retazo del año	29,6
Leña del año	58,5

Tabla LXXIV: Humedades de las fracciones de copa según destino.

	Tipo de poda	Fracción	Ecuación	Error relativo %	R ² ajustado	E.E.E.
Peso fresco	D	Leña	$Pv = 0.089 \cdot d^{2.16}$	5.1	56	0.35
	D	Retazo	$Pv = 0.10 \cdot d^{2.03}$	4.5	64	0.29
	O	Retazo	$Pv = 1.16 \cdot d^{1.26}$	4.5	64	0.29
Peso seco	D	Leña	$Ps = 0.06 \cdot d^{2.16}$	4.8	56	0,35
	D	Retazo	$Ps = 0,07 \cdot d^{2.20}$	3.3	92	0,25
	O	Retazo	$Ps = 0.86 \cdot d^{1.26}$	4.8	64	0,29

Tabla LXXV: Ecuaciones de biomasa ajustadas a partir de los árboles muestreados.

DESMOCHE						
Diámetro	Peso fresco (kg)			Peso seco (kg)		
	Leñas	Retazo	Total	Leñas	Retazo	Total desmoche
20	61	44	105	38	32	70
30	147	100	247	91	73	164
40	273	179	452	169	132	301
50	442	282	724	273	208	481
60	656	408	1064	405	301	706
70	915	558	1473	565	412	977
80	1221	732	1953	754	540	1295
90	1575	930	2505	973	687	1660

Tabla LXXVI: Relación diámetro/peso de biomasa para los árboles desmochados.

Diámetro	OLVIDADO	
	Peso fresco (kg)	Peso seco (kg)
20	52,7	38,2
30	87,9	63,6
40	126,3	91,4
50	167,3	121,1
60	210,5	152,4
70	255,6	185,1
80	302,4	219,0
90	350,8	254,0

Tabla LXXVII: Relación diámetro / peso de biomasa para los árboles olivados.

En la *Figura 275* se comparan los valores de pesos secos por clase diamétrica de las tarifas de biomasa del INIA para la fracción de ramas y hojas, con el peso seco estimado en el presente informe para el desmoche (considerando el retazo más la leña) y el del olivado.

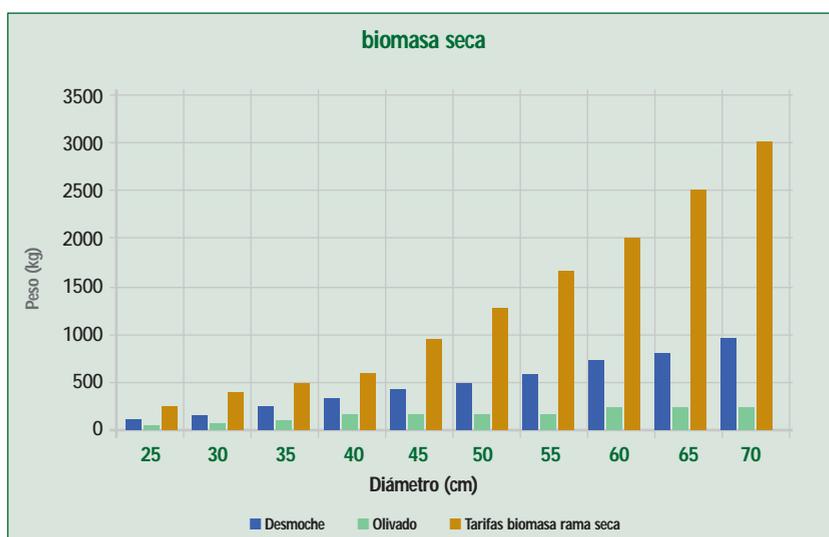


Figura 275: Tarifas de biomasa comparadas.

Las podas de olivado suponen cerca de un 25 % del peso de la copa para la clase diamétrica de 25 y conforme aumenta el diámetro del árbol este porcentaje disminuye, llegando al 6 % para diámetros de 70 cm. De igual manera para el desmoche, el porcentaje de la copa que se elimina en la clase diamétrica 25 es de casi el 55 % y disminuye a un 32% para diámetros de 70 cm. El hecho de que a medida que aumenta el diámetro el porcentaje de copa eliminado en la poda o el desmoche descienda se debe a que la copa va estando cada vez más formada y necesita menor intervención.

Al comparar los valores obtenidos de biomasa en los dos tipos de poda –olivo y desmoche–, se observa que el desmoche supone mucha mayor cantidad de biomasa extraída

(Figura 276). Esta diferencia aumenta conforme aumenta el diámetro de los árboles. Para la clase diamétrica de 20 cm, la biomasa del olivado es el 50 %, pero para diámetros de 80 cm la biomasa obtenida del olivado sólo alcanza el 13 % de la del desmoche, puesto que en los árboles mayores, en los olivados sólo se eliminan las ramas viejas y las puntas secas.

La biomasa del desmoche se compone de las leñas y el retazo, que es la fracción más fina que normalmente queda en el monte, que se distribuyen como se muestra en la Figura 277.

El porcentaje en peso del retazo frente a la fracción de biomasa total va descendiendo conforme aumenta el diámetro, siendo del 41 % para diámetros de 20 cm y del 37 % para diámetros de 95 cm.

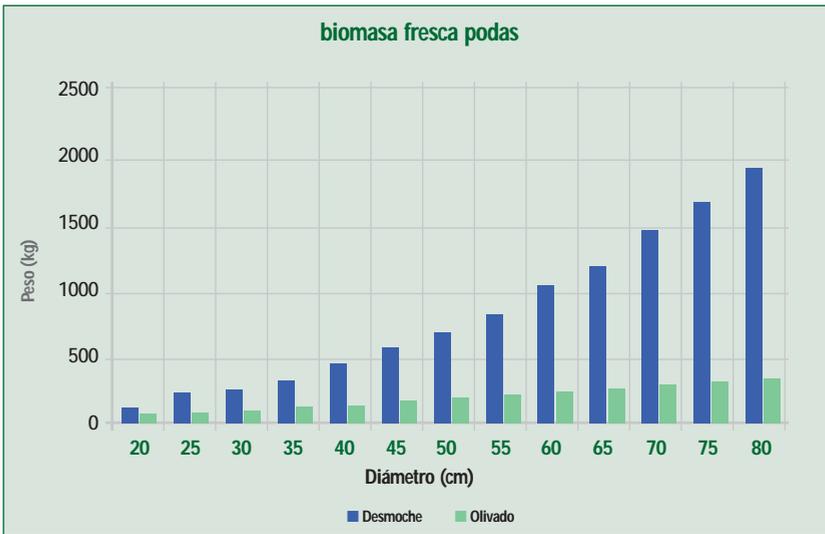


Figura 276: Tarifa de peso fresco de biomasa obtenida de desmoche y olivado.

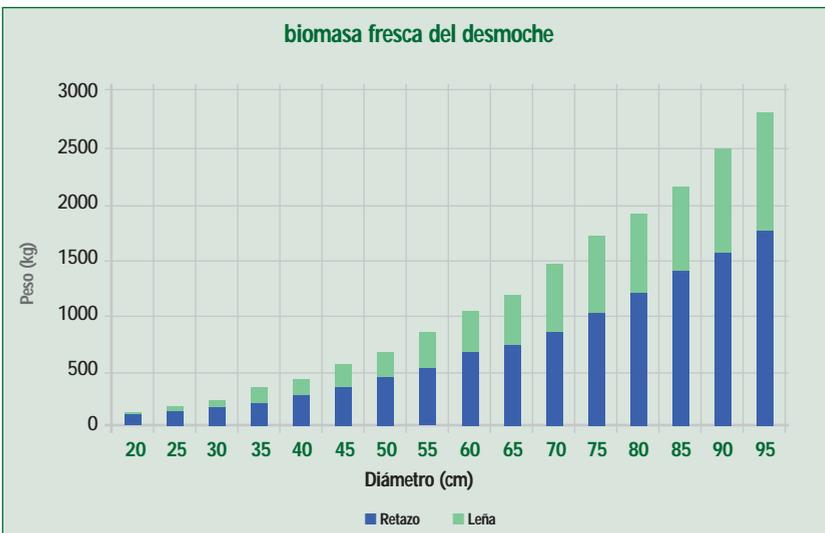


Figura 277: Tarifa de peso fresco de biomasa obtenida de una poda de formación, separando leña de retazo.

10.2.3.2. Estimación de la cantidad de biomasa obtenida en cada monte

Con las tarifas de peso descritas se estimó la biomasa obtenida por hectárea durante el aprovechamiento. Sólo se ha considerado el peso de las leñas en el estrato III, puesto que **en el resto de estratos las leñas que se cortaron fueron recogidas por los vecinos del lugar** y por lo tanto no se contabilizan en el presente estudio. Los resultados de la estimación se muestran en la *Tabla LXXVIII*.

Monte	Estrato	Sup (ha)	Total retazo	Total retazo	Total retazo	Leñas	TOTAL (t/ha)
120 Camaces	I	18,8	6,47	15,25	21,72		21,72
120 Camaces	II	15,34	5,22	7,80	13,03		13,03
120 Camaces	III	10,55	11,70	7,91	19,61	11,67	31,29
120 Camaces	IV	13,7	5,90	8,81	14,72		14,72
Tenebrón	V	42,51	4,91	7,12	12,03		12,03

Tabla LXXVIII: Estimación de biomasa producida como resultado de las podas en cada estrato.

En los estratos I y II, el retazo es el resultado de las podas del año anterior, por lo que el contenido en humedad es menor. La diferencia de humedad se ha tenido en cuenta a la hora de calcular las toneladas por hectárea que se pueden extraer, homogeneizando la humedad a un 30% en base seca, que es la le corresponde al retazo recién cortado.

En el estrato III, no se separaron las leñas del retazo, y se procesaron conjuntamente para su astillado. En esta zona, se ha estimado un peso de 31,29 t/ha, cantidad mucho mayor que en el resto de estratos.

En otras operaciones de poda con obtención de biomasa leñosa, como las experiencias en el olivar en Andalucía, se mencionan densidades que no superan las 2,5 t/ha (Martín, 2008).

10.2.4. Descripción de los trabajos realizados

10.2.4.1. Poda

La poda se hizo con motosierra, por operarios subidos al árbol. El método de trabajo fue distinto en cada monte, ya que eran empresas distintas las encargadas de llevar a cabo esta fase en cada monte.

En Camaces, la poda la llevaba a cabo una cuadrilla compuesta por seis operarios que trabajaban en parejas. Al ser la poda en altura un trabajo peligroso, el operario que subía al árbol cumplía unas medidas de seguridad, que consistían en una cuerda que, a través de un arnés, une al operario con un árbol cercano. Su pareja esperaba debajo para mantener la cuerda tensa y así evitar el choque contra el suelo o contra el tronco en caso de accidente (*Figura 278*).

En Tenebrón, toda la superficie fue podada por un único operario. Este operario trabajaba para otra empresa distinta a Tragsa y lo hacía a destajo (es decir que no cobraba por hora, sino por producción). En este caso, el podador se subía al árbol sin aplicar ninguna medida de seguridad (*Figuras 279 y 280*).



Figura 278: Sistema de trabajo en el monte de Camaces de los empleados contratados por Tragsa, contemplando medidas de seguridad (el dibujo de la izquierda se ha tomado de Tolosana y Laína -2009 a- y su autora es Aída Rodríguez García).

En las Figuras 281, 282 y 283 se ilustran gráficamente los resultados de los trabajos de olivado y desmoche.

10.2.4.2. Saca de la biomasa a pista con autocargador

El material extraído del monte para su posterior astillado es el retazo, salvo en el estrato III donde también se extrajeron las leñas. Las leñas del resto de los estratos fueron aprovechadas por empresas locales y vecinos para uso doméstico, como se ha indicado anteriormente. Los precios que se reciben en estos casos son más elevados que los que se podrían pagar por los usuarios de astilla, por lo que este último uso no se considera competitivo donde exista una demanda para uso doméstico.

En ambos montes, el autocargador se encargaba de recorrer toda la superficie para reunir el retazo a pie de pista con el fin de ponerlo al alcance de la astilladora. El resultado de esta operación fue la formación de cordones, que quedaron a ambos lados de una pista para que posteriormente fuesen astillados.

298



Figuras 279 y 280: Sistema de trabajo en el monte Tenebrón, sin medidas de seguridad.



Figura 281: Aspecto del árbol tras una poda de fructificación (olivado). Se observa cómo queda el retazo agrupado al pie de la copa.



Figura 282: Aspecto del árbol antes de la poda de formación (desmoche).



Figura 283: Aspecto del árbol tras la poda de formación (desmoche).

El autocargador utilizado fue un modelo antiguo, y el hecho de que la biomasa hubiera que recogerla de árbol en árbol en vez de estar agrupada o acordonada hizo que fuera muy lento en los desplazamientos. Para adaptar la caja del autocargador a la recogida de restos dispersos se colocaron unas mallas metálicas para hacer una pared entre los teleros (*Figura 284*).

10.2.4.3. Astillado

La cañonera de la astilladora expulsaba la astilla sobre un remolque de 20,28 m³ de capacidad, que transportaba la astilla a zonas del monte accesibles para los camiones que finalmente llevaban la astilla al centro de consumo.

Durante el trabajo, esta máquina tuvo numerosas averías. Por un lado, la dureza del material hacía que las cuchillas se desgastaran con mucha frecuencia (había que cambiarlas cada día y medio aproximadamente).



Figura 284: Autocargador sacando la biomasa de poda.

Por otro lado, las pilas de retazo contenían muchas impurezas, ya que el autocargador cuando levantaba el retazo también levantaba arena y piedras. Eran éstas las que mayores problemas originaban y la causa aparente de la mayoría de las averías.

10.2.5. Estudio de rendimientos y productividad

Se realizó el seguimiento de cada fase de trabajo. Para ello, se procedió al cronometraje de cada actividad y se relacionó el tiempo empleado en cada operación con la cantidad de retazo tratada durante el tiempo cronometrado con el fin de calcular la productividad.

10.2.5.1. Productividad de la poda

En Camaces (estratos I a IV), la poda se ejecutó por parejas de operarios, uno de ellos trepaba al árbol y el otro se quedaba en el suelo sujetando el extremo de la cuerda, que mediante un sistema de polea aseguraba al operario que ascendía al árbol frente a una posible caída. En la eficiencia por árbol se contabiliza el tiempo de los dos operarios.

Otra diferencia entre los dos estratos en el método de trabajo es que en Tenebrón (estrato V), el operario, según iba podando los árboles, preparaba y cortaba la leña, mientras que en el caso de Camaces, durante el tiempo que se registraron los trabajos, los operarios únicamente podaban los árboles, y reservaban el trabajo de cortar y preparar la leña para aquellos días que las condiciones meteorológicas les impidiesen subir a los árboles para llevar a cabo las labores de poda. Por lo tanto, el trabajo de la pareja de podadores de Camaces haciendo leña no fue registrado.

En la siguiente *Tabla LXXIX* se presenta un resumen de las principales características del cronometraje en los dos montes.

	CAMACES	TENEBRON
Jornadas cronometradas	4	2
Tiempo total cronometrado (horas)	23,9	12,4
Nº de árboles registrados	66	24
Desmoche	40	10
Olivo	26	14
Eficiencia (min/árbol)	43,45	33,73
Rendimiento (t/h)	0,51	1,01

Tabla LXXIX: Comparación entre cronometrajes en ambos montes.

El rendimiento en Tenebrón fue prácticamente el doble que en Camaces (1,01 frente a 0,51 t/h), y el tiempo medio que se empleaba en podar un árbol fue mucho menor en Tenebrón (33,7 min) frente a Camaces (43,45 min).

La diferencia de rendimientos entre un monte y otro se debe sobre todo a las medidas de seguridad que contemplaban los operarios en el monte de Camaces. Sin embargo, en Tenebrón, junto con el podador estaba su mujer, cuyo presencia no se ha contabilizado como tiempo de trabajo, y que le ayudaba a colocar la escalera y a tener a su disposición las herramientas necesarias. Además, la mujer apilaba la poda facilitando el posterior picado. Por todo ello, y en aras de una correcta ejecución de los trabajos, parece más realista la estimación correspondiente al monte de Camaces.

A la hora de calcular el rendimiento, se ha considerado la suma del peso del retazo y de la leña (en caso de desmoche) de cada árbol podado. Sin embargo, los operarios de Camaces, durante el tiempo registrado sólo podaban el árbol, mientras que el operario de Tenebrón podaba el árbol y dejaba preparada la leña. Más adelante se verá cual sería el rendimiento estimado de los operarios de Camaces incluyendo también las operaciones de preparación de la leña.

En la gráfica de la distribución porcentual de tiempos por operaciones (Figura 285), se observan las siguientes diferencias entre las dos formas de trabajo:

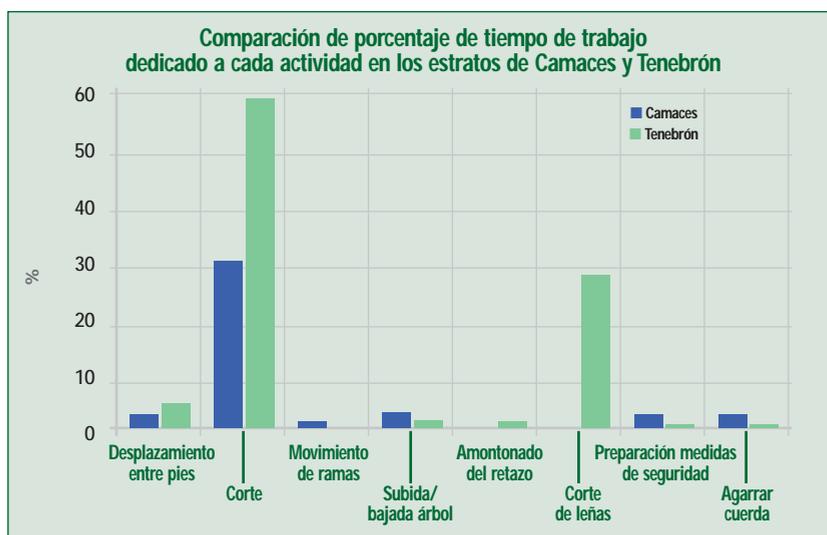


Figura 285: Distribución porcentual de tiempos dedicados a cada operación en los dos montes.

- Los operarios de TRAGSA en Camaces emplearon menos tiempo en la operación del corte de poda que el operario autónomo en Tenebrón (13,47 min/árbol en Capaces frente a 19,68 min/árbol en Tenebrón).
- El operario autónomo trocea las ramas para conformar la leña. El tiempo empleado para esta labor es del 18,38 % del tiempo total, 13,65 minutos por árbol desmochado. Los operarios de TRAGSA programan esta tarea para los días de lluvia.
- Uno de los operarios de TRAGSA está una media de 16,33 minutos por árbol atento al operario que asciende al árbol y sujetando la cuerda de seguridad.

El **tiempo de corte** empleado en la poda es un 46 % mayor en el caso del olivado frente al desmoche. Por ejemplo, en Tenebrón, el tiempo dedicado a olivar un árbol sería de 20,75 minutos y de 14,22 para hacer el desmoche.

Para poder comparar los rendimientos en los dos casos de una manera más efectiva, se ha supuesto que el tiempo que dedicarían los operarios de TRAGSA a preparar la leña sería el mismo que empleaba el operario autónomo que podaba en Tenebrón (13,65 minutos/árbol). Durante el tiempo total de trabajo los operarios en Camaces desmocharon 40 árboles, por lo que el tiempo dedicado a preparar la leña de esos árboles sería de 546 minutos (9,1 horas adicionales al tiempo durante el que se estuvieron registrando estos trabajos).

Aceptando esta hipótesis, el tiempo medio por árbol aumentaría de 43,45 min/árbol a 51,73 min/árbol y el rendimiento disminuiría de 0,51 t/hora a 0,43 t/hora, para las operaciones que se ilustran en la *Figura 286*.



Figura 286: Poda con dos operarios, uno de ellos se mantiene en el suelo sujetando las cuerdas de seguridad.

10.2.5.2. Saca con autocargador

Se ha estudiado por separado el rendimiento del autocargador recogiendo restos en los cinco estratos en los que se ha diferenciado la masa (*Tabla LXXX*).

- En los estratos I y II, donde el retazo recogido era del año anterior, se observa **menor productividad debido a la fragilidad del material**, ya que para realizar una carga tenía que

Estrato	Tiempo total (horas)	Nº de ciclos	Volumen aparente (m ³)	Productividad (m ³ /h)	Productividad (t verde/h)
I	14,57	14	741,9	50,9	5,6
II	9,93	11	423,0	42,6	4,7
III	15,37	25	1154,9	75,1	8,3
IV	11,43	12	400,5	35,0	3,9
V	4,16	4	315,0	75,6	8,3

Tabla LXXX: Resultados de la toma de tiempos de la saca.

- amontonarlo primero y reunirlo. La diferencia entre ambos estratos ha resultado escasa, a pesar de que cuando la masa se mezclaba con pino la máquina tenía que maniobrar más.
- En el estrato IV, **la escasa productividad se explica por la mayor densidad de la masa, que dificultaba la transitabilidad del autocargador** y por tanto, el mayor número de maniobras que necesita hacer el operario para circular por la masa y poder recoger el material. En cuanto a la carga del material, esta no representaba problemas dado que el retazo de este año estaba menos seco y, por lo tanto, no se “rompía” tanto al recogerlo. Por otra parte, parece que el retazo se recoge más fácilmente en cordones que si se encuentra en montones bajo las copas porque en muchos casos no resultan accesibles.
 - **En el estrato III, no se separó el retazo de la leña. En este caso los rendimientos son mayores porque las ramas tienen mayor tamaño y se recogen con mayor facilidad.** La masa en esta zona es muy abierta lo que favorece la maniobrabilidad. Además la producción es mayor en comparación ya que la leña hace que se saque más cantidad (en peso) por unidad de tiempo. El análisis de la varianza diferencia este estrato de los demás, por tanto **se puede afirmar con significación estadística superior al 95% que son estas las condiciones experimentadas que dan lugar al mayor rendimiento.**
 - Por último, se analizó la productividad del estrato V. **En este monte el retazo aparece separado de la leña pero las ramas se mantienen enteras lo que facilita la recogida.** La masa es menos densa y completamente llana así que hay que realizar menor número de maniobras y aunque las distancias son más largas los desplazamientos son más rápidos. La distribución de los tiempos en los estratos se refleja en la *Figura 287*.

Se han ajustado dos ecuaciones predictivas para el rendimiento del autocargador extrayendo restos. Una para el estrato III en las que se recoge la leña junto al retazo y otra para el resto de estratos (*Tabla LXXXI*).

Las variables **Nº cargas** y **DSC (distancia semi-cargado), (m)** son el número de viajes de la grúa para recoger el retazo (y, en su caso, la leña) hasta llenar la caja del autocargador,

Estrato	Ecuaciones predictivas	R ² ajustado	Error relativo (%)	n
Estrato III	$T \text{ ciclo (min/ciclo)} = 289 + (0,91 \times DDV) + (1,2 \times DSC) + (43,9 \times N^{\circ} \text{cargas}) + (1,5 \times DDC)$	23	8,2	23
Resto estratos	$T \text{ ciclo (min/ciclo)} = 147,3 + (1,0 \times DDV) + (1,3 \times DSC) + (65,43 \times N^{\circ} \text{cargas}) + (0,8 \times DDC)$	93	6,4	40

Tabla LXXXI: Ecuaciones predictivas de la saca de restos con autocargador.

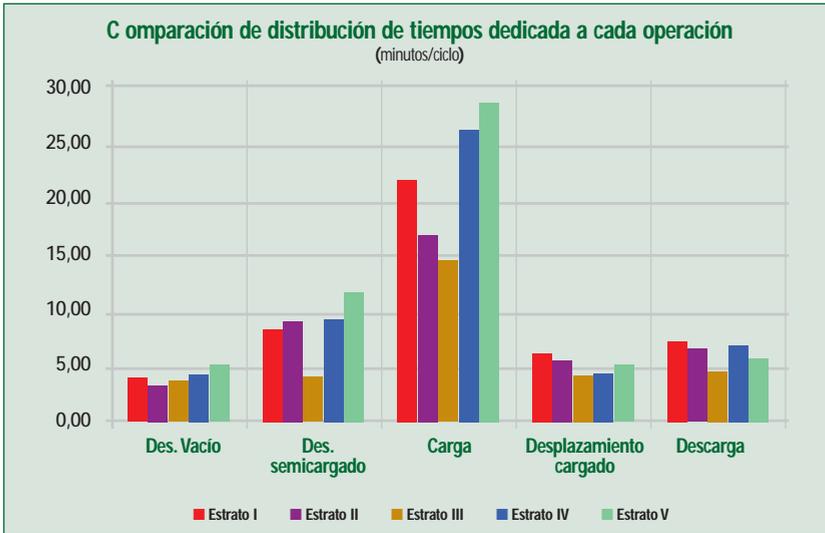


Figura 287: Comparación de distribuciones de tiempos por operación en la saca de biomasa en los estratos estudiados.

y la distancia recorrida entre dos operaciones de carga, respectivamente. Estas variables recogen el grado de amontonamiento de los restos y la maniobrabilidad del autocargador en el monte. Como ya se ha comentado, en el estrato III los restos estaban menos fraccionados. En el análisis de varianza queda estadísticamente demostrado que la media del número de cargas en el estrato III, (15 cargas) es significativamente distinta del número de cargas en los otros estratos que oscila entre 20 y 30 viajes de grúa por ciclo del autocargador. Igualmente la distancia media semicargado que debe hacer el autocargador por ciclo en el estrato III es de 243 m frente a los 320 m del estrato IV y los más de 500 m del resto de estratos.

Las variables DDV (distancia de desplazamiento vacío) y DDC (Distancia de desplazamiento cargado), en metros, dependerán de la distancia media que haya que recorrer entre los puntos donde hay que recoger los restos y los cargaderos.

10.2.5.3. Astillado

A la hora de estudiar el rendimiento de la astilladora se diferencié la productividad de esta astillando retazo de este año, retazo seco de la poda del año anterior, y el retazo más la leña recogidos en el estrato III. En el cuadro de la *Tabla LXXXII* se resumen los principales resultados de la comparación.

Tipo de retazo	Tiempo cronometrado (minutos)	Productividad (m ³ /h)	Productividad (t/h)	Índice de astillado
Retazo y leña	73	16.7	6.2	0,95
Retazo del año	268	13.6	5.0	0,77
Retazo del año anterior	428	16.2	5.9	0,79

Tabla LXXXII: Resultados de la toma de tiempos del procesado de biomasa.

Otras experiencias de aprovechamiento de biomasa forestal

El índice de astillado es el cociente entre el tiempo en que el rotor de la astilladora está procesando la biomasa y el tiempo productivo de la grúa, para cuantificar los momentos en que la astilladora no está procesando biomasa por una alimentación menos productiva. Un mayor índice de astillado supone una alimentación más eficaz.

- **El mayor rendimiento se alcanzó en el astillado conjunto de leña y retazo.**
- Con los datos obtenidos, **el rendimiento del procesado de biomasa del año anterior es mayor que el de la biomasa fresca.**
- El cambio de cuchillas supuso alrededor del 10% del tiempo de trabajo.
- La astilladora estaba parada mientras el camión volquete hacía el transporte y descarga de la astilla. Esto supuso el 27% del tiempo de trabajo.

Con el fin de relacionar el volumen de retazo astillado con el peso de astilla resultante se decidió pesar dos camiones llenos de astilla. Se obtuvieron las siguientes proporciones (*Tabla LXXXIII*). Como se observa en la tabla, la poda del año anterior, al tener un menor contenido en humedad, tiene menos densidad que el retazo del año.

	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)
Poda del año (2008)	8080	398,42
Poda del año anterior (2007)	7040	347,14

Tabla LXXXIII: Pesos tarados y densidades de la biomasa astillada en el camión de transporte.



Figura 288: Astilladora móvil remolcada por tractor agrícola descargado la biomasa sobre remolque de camión.

10.2.6. Costes

Los costes estimados de las operaciones de poda, saca con autocargador y astillado aparecen resumidos en las siguientes tablas (*Tabla LXXXIV*):

En la construcción del coste unitario se podría excluir el coste de la poda, puesto que es un trabajo selvícola asumido por la propiedad para mejorar la fructificación de las quercíneas.

	Poda			
	Tiempo/árbol (horas)	Rendimiento (t/hora)	Coste árbol (euros)	Coste unitario (euros/t)
Tenebrón	0,52	1,01	9 €/árbol	17,14
Camaces	0,86	0,51	18 €/árbol	41,04
Autocargador				
	Rendimiento (t/horas)	Coste horario (€/hora)	Coste unitario (€/t)	
Estrato I	5,6		10,71	
Estrato II	4,7		12,81	
Estrato III	8,3	60 €/h	7,26	
Estrato IV	3,9		15,57	
Estrato V	8,3		7,21	
Astilladora y saca con camión a cargadero				
	Rendimiento (t/horas)	Coste horario (€/hora)	Coste unitario (€/t)	
Retazo y leña	6,2		24,19	
Retazo del año	5,0	150 €/h	30,00	
Retazo del año anterior	5,9		25,42	

Tabla LXXXIV: Tablas de costes, referidos a la tonelada verde.

as con el objeto de mantener una ganadería extensiva. Es decir, que el motivo principal de los trabajos no es la obtención de biomasa.

En la presente experiencia, el coste de la saca con autocargador varía entre 7,21 y 15,57 €/t, y el de la astilladora entre 24,2 y 30 €/t.

Para el estudio de costes, se plantean tres casos diferentes, en ninguno de los cuales se considera el coste de la poda como incluido en el de obtención de la biomasa.

1ª Astillado de leña y retazo.

$$7,26 + 24,19 = 31,45 \text{ €/t}$$

2ª Astillado únicamente de retazo podado en el año anterior.

$$12,81 + 25,42 = 38,23 \text{ €/t}$$

3ª Astillado únicamente de retazo podado en el presente año.

$$8,3 + 30 = 38,3 \text{ €/t}$$

A este valor habría que añadirle los costes indirectos y de estructura (estimados en un 15%) y los beneficios empresariales (para los que se considera admisible un valor de referencia del 12%). A estos gastos, faltaría añadir los costes de transporte que, para una distancia media de 50 km, se estiman en alrededor de 8,5 €/t. Con estas suposiciones se obtendrían unos costes totales de la tonelada de astilla en cargadero de una planta consumidora (sin incluir un posible pago a la propiedad del monte por la biomasa “en pie”) de entre 48,5 y 57,2 €/t.

Con estos costes, este tipo de aprovechamiento de biomasa hoy por hoy se encuentra limitado para resultar viable económicamente, puesto que el precio que se podría pagar en la actualidad por la tonelada de astilla verde puesta en central se encuentra, como máximo para este tipo de material, entre los 45 y los 50 €/t. Esto limitaría, de acuerdo con las estimaciones obtenidas de este estudio, la rentabilidad potencial al caso de astillarse conjuntamente la leña y el retazo, opción que rara vez será competitiva dado el elevado precio de las leñas. No obstante, cabe considerar que existen algunas posibilidades de mejora, tanto en cuanto a la forma de apilado como al uso de vehículos de saca de mejores condiciones (con pinza tipo pulpo y mayor capacidad) como al uso de una astilladora más potente, con motor independiente, que habría reducido probablemente los costes y mejorado con toda seguridad la productividad de esta operación.

Actualmente, existe un aprovechamiento y mercado de leñas para uso térmico doméstico. Dependiendo del monte, su accesibilidad y el equilibrio de oferta y demanda coyuntural, algunas empresas llegan hasta aprovechar parte de retazo o dejar en el monte la leña. Un precio orientativo y aproximado de venta a pie de monte de esta biomasa procesada y agrupada en forma de leña es de 66 €/t. Un intermediario almacenista transporta y almacena para su venta a particulares.

En un desarrollo de la demanda de biomasa procesada en forma de astillas o triturado puede coexistir con el procesado y venta de leña, que tiene mayor valor añadido pero tiene una demanda reducida que no consume toda la biomasa producida.

10.2.7. Conclusiones

10.2.7.1. Sobre las existencias de biomasa

- La cantidad de biomasa resultante del **retazo de una poda donde se han combinado podas de fructificación y formación oscila entre 12 y 22 t en verde/ha** para estos montes, **para una humedad media del 30%**.
- **La biomasa del retazo supone en torno a un 40 % del peso total del material podado.** El 60% restante correspondería a la leña.
- **La humedad de la leña recién podada es el 58,5% sobre peso seco y, en el caso del retazo, la humedad de las ramas podadas en el año es del 29,5 % y del 20,5 las podadas en el año anterior** y que se han dejado secar durante todo un año. **Es una humedad baja, lo cual supone una calidad de la biomasa mayor.**

10.2.7.2. Sobre la organización de los trabajos

- Para optimizar los trabajos siempre habrá que **buscar la coordinación entre las distintas fases del aprovechamiento.** Por un lado, la leña y/o el retazo deberían quedar **reunidos tras la poda de forma que el autocargador o máquina encargada del acopio los recoja más fácilmente.** Para ello se debe elegir el medio de carga desde el principio con el fin de que los trabajadores encargados de la poda conozcan la mejor forma en que deben dejar los restos preparados para la fase siguiente.

10.2.7.3. Sobre las operaciones de poda

- El hecho de contemplar **las medidas de seguridad** descritas en los trabajos de poda que se hacían por los operarios de Tragsa en el monte de Camaces, **hace que el rendimiento no llegue ni a la mitad** en comparación con los trabajos de Tenebrón donde el operario trabaja sin contemplar ninguna medida de protección aparente. **El rendimiento es de 0,43 t/hora en Capaces frente a 1,01 t/hora en Tenebrón.**
- **Existen experiencias en las que los operarios realizan las podas subidos a plataformas elevadoras y sujetos por un arnés**, de manera similar a las podas que se hacen en las choperas. Puede ser **interesante estudiar este método de trabajo**, en el que se respetan unas normas de seguridad pero no es necesaria la intervención de dos operarios.
- **El tiempo medio empleado en la poda de un árbol es de 33,73 minutos en el estrato de Tenebrón, y de 51,73 minutos para Camaces (sumando el tiempo de trabajo de los dos operarios).**
- **El tiempo necesario para una poda de fructificación (olivado) es un 46% mayor que para una poda de formación (desmoche)**, a pesar de que, tras la poda de formación, la preparación de las leñas supone 13,65 minutos /árbol de media.

10.2.7.4. Sobre la reunión y saca de biomasa bruta con autocargador

- Los **productos de la poda deberían quedar reunidos en el menor número de cordones posible** para que la astilladora tuviera que realizar menos desplazamientos. **El rendimiento que se obtuvo en la saca osciló entre 3,9 y 8,3 t verde de astilla/hora de trabajo.**
- **La saca de material verde incluyendo retazo y leña con un espaciamiento amplio entre pies suficiente para las maniobras del autocargador son las condiciones más favorables para esta operación**, que puede alcanzar rendimientos de hasta 8,3 t verde/h.
- **El retazo debería quedar limpio, con el menor número de impurezas posible. Para ello la pinza que los recoge debería tocar lo mínimo el suelo con el fin de no levantar piedras y arena. Una pinza sin travesaños (tipo “pulpo”) sería la mejor opción.**

10.2.7.5. Sobre el astillado y saca de biomasa procesada

- Dado el número de averías observado **se debería plantear el cambio de tipo de astilladora** y optar una **máquina más potente** para que las piedras y la arena no influyan de manera tan negativa sobre su trabajo. **El rendimiento medio que se obtuvo en el procesado de la biomasa uniendo retazo y leña fue de 6,2 t verde por hora.**
- Se debe destacar que, en el caso del retazo, **el rendimiento de astillado de material del año anterior, con menor humedad, fue mayor que el rendimiento del procesado del material en verde (5,9 frente a 5,0 t/h).**

- Una trituradora de martillos podría en principio, presentar menos problemas que una astilladora ya que no tendría el inconveniente del desgaste de las cuchillas y normalmente no les afecta tanto la presencia de impurezas. Este tipo de maquinaria es la más habitual para astillar material de estas características. No obstante, el material producido es más grueso y presenta menos homogeneidad, considerándose por lo general de menos calidad como combustible
- **Un solo camión con volquete para evacuar la biomasa procesada fue insuficiente para la producción de la astilladora, llegando a estar parada en espera de que el camión fuese a descargar su contenido hasta un 27 % del tiempo de trabajo. Se debería reforzar el sistema con más camiones.**

10.2.7.6. Sobre los costes de la operación

- **En las condiciones del presente estudio, el coste de la tonelada verde de astilla puesta en central variaría entre 48,5 y 57,2 €/t.** Con estos costes, este tipo de aprovechamiento de biomasa hoy por hoy se encuentra limitado para resultar viable económicamente, aunque se han señalado bastantes posibilidades para su mejora y probable abaratamiento sensible.
- Actualmente **existe un aprovechamiento y mercado de leñas para uso térmico doméstico, en el que se está pagando alrededor de 66 €/t por esta biomasa procesada y agrupada a pie de árbol.**
- **En un desarrollo de la demanda de biomasa procesada en forma de astillas o triturado puede coexistir con el procesado y venta de leña, que tiene mayor valor añadido pero tiene una demanda reducida que no consume toda la biomasa producida.**

SITUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL EN TRES PAÍSES CERCANOS CON DISTINTAS POLÍTICAS DE FOMENTO: PORTUGAL, FRANCIA E ITALIA CONCLUSIONES SOBRE POLÍTICAS DE INCENTIVACIÓN A LAS ENERGÍAS RENOVABLES DE ORIGEN FORESTAL

11.1. Introducción

11.1.1. Localización

La principal diferencia en cuanto al estímulo del uso de biomasa forestal para la producción de electricidad en estos tres países (entre sí y también la diferencia con España), se encuentra en los diferentes sistemas de incentivos y niveles de tarifas reguladas de ayuda a la producción eléctrica, que se pueden apreciar en la *Tabla LXXXV*, y de forma más detallada para el caso español en la *Tabla LXXXVI*, que se refiere a la situación después del R.D. 661/2007.

País	Tarifa regulada 0 "premium" (Precio Medio del kWh Eléctrico con biomasa Forestal, c€/Kwh)
Portugal	10,8
Francia	7,13
Italia	20,00
España	11,83

Tabla LXXXV: Tarifas reguladas o "premium", en c€/kWh eléctrico producido con biomasa forestal en Europa a inicios de 2007

(Decreto Ley 661/2007)
Subsidios para energías renovables

	RD 661/2007 c€/kWh Prima (primeros 15 años)	RD 661/2007 c€/kWh Tarifa regular (primeros 15 años)
Cultivos energéticos (P>2MW)	10,09	14,66
Residuos agrícolas (id.)	6,19	10,75
Residuos Forestales (id.)	7,83	11,83
Residuos de industrias agrícolas (id.)	6,38	10,95
Residuos de industrias forestales (id.)	3,00	7,13
Lejías negras (id.)	9,30	4,96

Tabla LXXXVI: Primas y tarifas reguladas en España, después del R.D. 661/2007 (el precio medio de casación entre enero y septiembre de 2008 ha sido de 6,45 c€/Kwh, por lo que el precio más la prima es ventajoso con respecto al precio regulado).

La diferente tradición en cuanto al uso de leña para calefacción doméstica, la importancia de las industrias forestales que utilizan sus propios residuos y subproductos para producir electricidad, y la diferente cuantía de las citadas primas eléctricas explica las grandes diferencias en la producción de energía primaria y eléctrica con biomasa sólida (Figura 289).

Se puede apreciar que Francia tiene un gran consumo térmico *per capita* frente a Italia, que tiene la máxima producción eléctrica debido a los elevados incentivos (que, además, van a subir de inmediato hasta 28 c€/kWh de tarifa regulada *premium*), según Spinelli (noviembre de 2008).

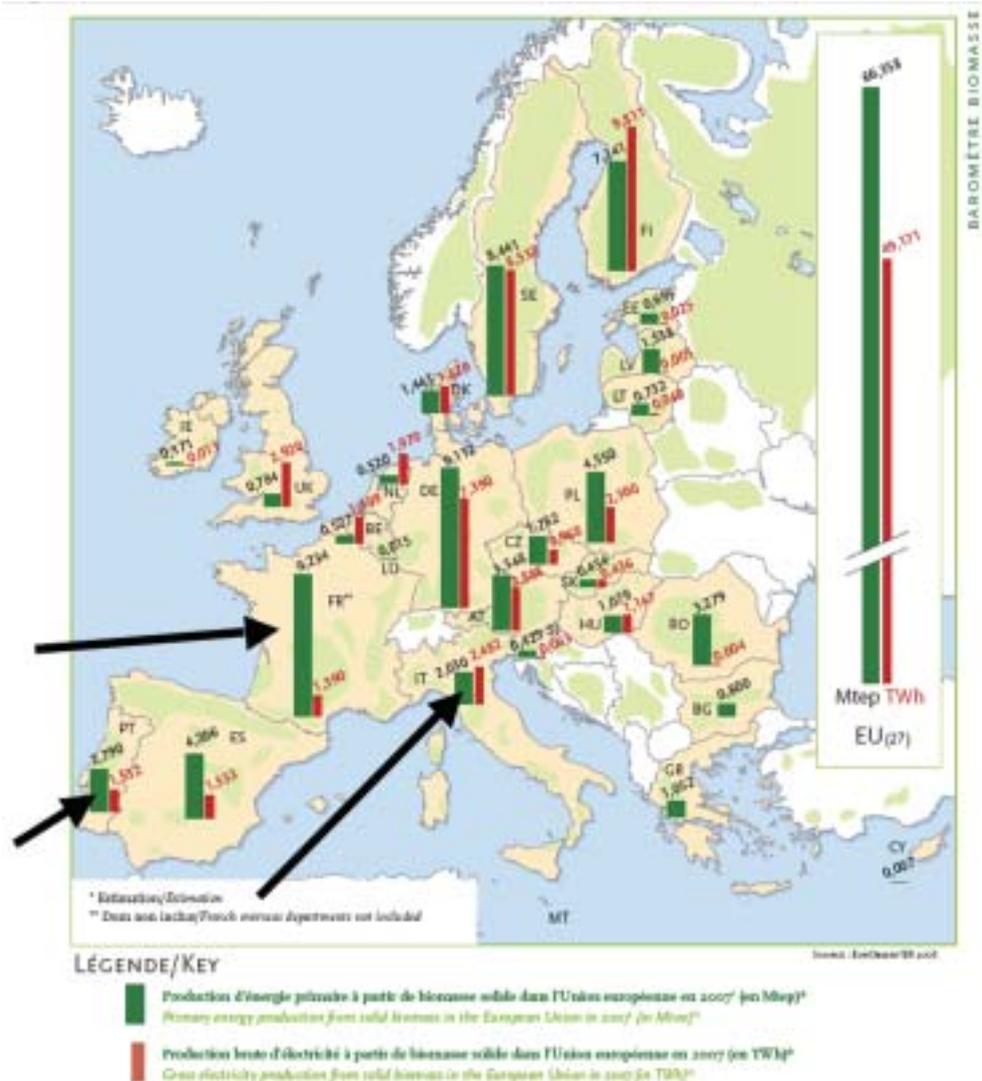


Figura 289: Producción de energía primaria (Mtep) y producción bruta de electricidad (TWh) a partir de biomasa sólida en los países de la U.E. en 2007. Fuente: EurObserv'ER Solid Biomass Barometer – December 2008.

11.2. La situación en Portugal

11.1.2. Contexto energético en la época reciente

La importancia de la biomasa en el consumo de energía primaria y la generación eléctrica para Portugal en 2003 se muestra en la *Tabla LXXXVII*.

Los porcentajes representados por los distintos combustibles forestales se presentan, para el año 2004 y sobre un total de 38200 TJ, en la *Figura 290* (Fuente: DGGE, 2005). Se aprecia cómo los residuos forestales suponen un notable 40%, sin considerar el uso para calefacción doméstica, al revés que la situación en España, en que la importancia de los residuos forestales no industriales es casi irrelevante (no obstante, parece probable que en ese gráfico se incluyan como residuos forestales las cortezas separadas de la madera en las fábricas de celulosa de fibra corta, serrerías y fábricas de tableros).

Población	10,36 millones	
Consumo primario bruto de energía	35,4 Mtep	1480 PJ
* del cual procede de biomasa	7,2 Mtep	303 PJ
Participación de biomasa en la generación eléctrica	0,9 Mtep	36 PJ
biomasa en el consumo energético final ^{*)}	4,8 Mtep	199 PJ

^{*)} Cifra de participación de biomasa y residuos en el consumo energético final en 2003.

Tabla LXXXVII: Importancia de la biomasa en el sector energético portugués, 2003.
(Fuente: DGGE, 2005).



Figura 290: Importancia de diferentes combustibles forestales en la generación de energía primaria con biomasa forestal en Portugal en 2004.

Los usuarios de biomasa forestal con capacidad de producción energética anual de más de un MW térmico en Portugal en 2004 se muestran en la *Tabla LXXXVIII* (Fuente: DGGE, 2005). Se observa que existían 9 plantas de cogeneración y 5 de generación eléctrica, que producían casi 500 MW eléctricos, además de las calderas instaladas en las fábricas de celulosa, que suponían 332 MW eléctricos (a los que habría que añadir 8 MW eléctricos más en serrerías). En otras industrias, se producían otros 318 MW eléctricos en 2004.

USUARIOS DE BIOMASA	Cantidad	Unidades
Plantas de cogeneración con biomasa	9	Instalaciones
Capacidad instalada de calderas	1400	MWt
	371	MWe
Plantas de generación eléctrica con biomasa	5	Instalaciones
	119	MWe
Plantas alimentadas con biomasa en la industria de celulosa Capacidad de calderas de biomasa sólida en plantas de celulosa	7	Instalaciones
	500	MWt
	332	MWe
Capacidad de calderas de recuperación en plantas de celulosa	-	MWt
	-	MWe
Plantas alimentadas con biomasa en serrerías Capacidad de calderas alimentadas con biomasa en serrerías	2	Instalaciones
	44	MWt
	8	MWe
Plantas alimentadas con biomasa en otras industrias forestales Capacidad de calderas alimentadas con biomasa en otras industrias forestales	5	Instalaciones
	318	MWt
	119	MWe

Tabla LXXXVIII: Usuarios de biomasa para producción de energía en Portugal en 2004 (más de un MW térmico).

El uso de biomasa es muy importante en las industrias forestales, que obtienen un 73% de la energía primaria que necesitan a partir de biomasa, si bien el 83% de esa biomasa proviene de leñas negras y el 15% de cortezas, con lo que la importancia de la biomasa forestal residual es pequeña en ese ámbito (Figuras 291 y 292).

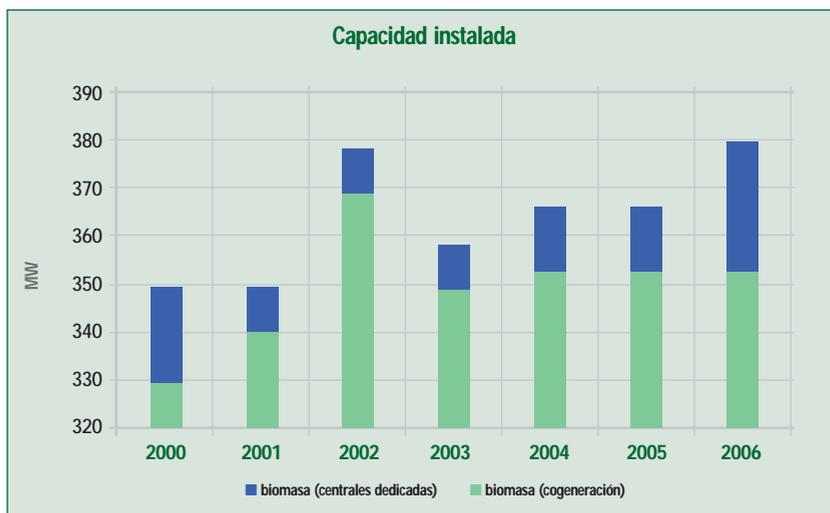


Figura 291: Capacidad eléctrica instalada en la industria forestal, MW. Fuente: DGE, Renováveis estatísticas rápidas, Novembro 2007.

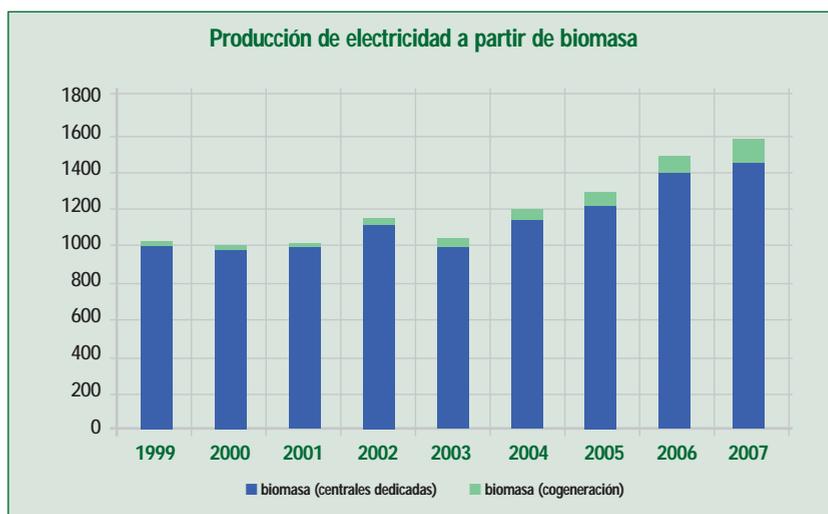


Figura 292: Producción de electricidad por la industria forestal, GWh. Fuente: DGEG, Renováveis estatísticas rápidas, Novembro 2007

En este contexto, se han producido políticas activas de generación de demanda de biomasa forestal por parte del sector público, como la implicación de la empresa pública estatal EDP (Energia do Portugal) en la construcción de plantas piloto, como la de Mortagua (1997), instalación que ha sido privatizada en 2004 y pertenece al grupo papelerero CAIMA (Figura 293).



Fig 293: Central eléctrica de Mortagua, en el área de Coimbra.

La política de incentivos a la generación eléctrica con biomasa y a la co-combustión ha consistido en un apoyo económico moderado pero creciente. En 2005, se incrementaron las políticas de incentivación directa, produciéndose un incremento en la Tarifa Verde para la biomasa forestal (DL n.º 33-A/2005), según se muestra en la Figura 294.



Figura 294: Evolución de las tarifas reguladas para renovables en Portugal.

En cuanto a la co-combustión, se ha conseguido que algunas centrales térmicas sustituyan entre un 5 y un 10% de su consumo de carbón por biomasa, como las de Pego o Sines, de acuerdo con las estadísticas oficiales. Algunas cementeras, como la de Secil en el área de Estoril, están también consumiendo biomasa desde 2005, aprovechando las oportunidades generadas por la obligación de tratamiento de los restos en masas de pino resinero afectadas por el nematodo.

11.2.2. Situación actual del sector de la biomasa Forestal en Portugal

El mercado de la biomasa forestal ha adquirido un gran desarrollo después de los concursos públicos abiertos en marzo de 2006. El Gobierno de Portugal convocó un concurso público para 15 plantas de biomasa que representan más de 100 MWe instalados de potencia eléctrica, con la siguiente tipología:

- 8 plantas de entre 2 y 6 MWe, orientadas a demandas locales.
- 7 plantas de entre 10 y 12 MWe, orientadas a grupos industriales.

En total, la demanda conjunta de biomasa supondría el consumo de más de un millón de toneladas, que deberían extraerse de los montes.

El objetivo final es alcanzar los 250 MWe instalados de potencia eléctrica en la escala nacional a partir de biomasa forestal. Pero, por el momento, ninguna de esas plantas proyectadas está funcionando ni siquiera ha sido construida.

El mapa de las plantas actuales junto con las proyectadas se muestra, superpuesto con un mapa de recursos y otro de riesgo de incendios, en la *Figura 295*.

En cuanto al uso térmico de la biomasa, una fuerte tradición y una política de impulso decidido han conducido a una producción de 2,8 millones de tep de energía primaria a partir de biomasa (en valores *per capita*, más del doble que en España). La producción de ener-

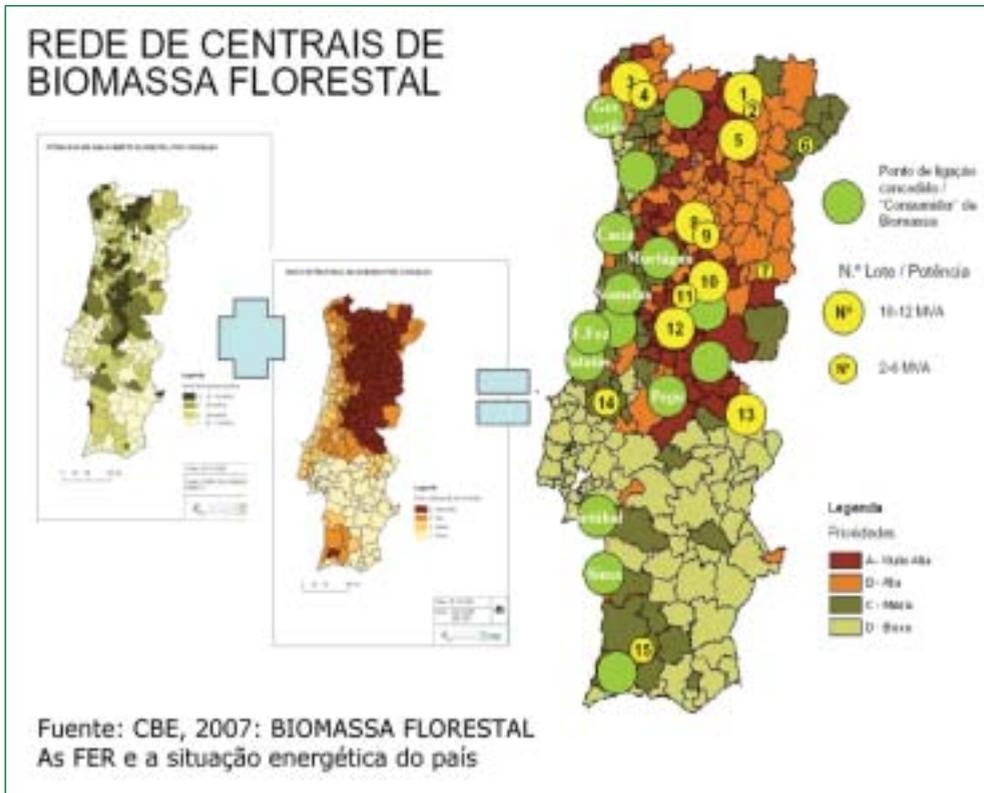


Fig 295: Plantas existentes y proyectos concedidos para utilización de biomasa forestal en Portugal.

gía eléctrica a partir de biomasa era, en 2007, casi cuatro veces superior a la española en valores por habitante, mostrando el éxito de unas primas ligeramente superiores entre 2005 y 2007, y de una implicación directa de la Administración en proyectos de demostración, pero también la mayor superficie forestal y el predominio de las plantaciones productivas de eucalipto y pino marítimo en buena parte del país. No obstante, son evidentes las dificultades de despegue de los nuevos proyectos aprobados, a pesar de que su aprobación se supeditó a la presentación de planes de suministro.

11.2.3. Tecnologías empleadas para el aprovechamiento de biomasa

Antes de las subidas de precios de los combustibles fósiles, una parte muy considerable de la biomasa forestal consumida era astillada en las plantas. Actualmente, cerca del 80% de los residuos forestales consumidos con fines energéticos se astillan en cargadero o borde de pista, cerca de los montes en que se producen (Sousa, 2008).

La biomasa, que proviene en su mayoría de residuos de cortas a hecho de plantaciones, es extraída y astillada sobre contenedores o cargada en camiones y transportada como astillas a las plantas de producción de energía.

Como consecuencia de la subida de la tarifa de energía producida con biomasa desde

2005, las industrias están cambiando sus calderas para incrementar su producción eléctrica.

El aprovechamiento de residuos de aprovechamiento se lleva a cabo principalmente usando los mismos equipos que se emplean para los aprovechamientos madereros (*Figuras 296 a 299*).

La mayor inversión que han tenido que afrontar los maderistas ha sido para adquirir las astilladoras industriales de alta capacidad que se necesitan para astillar adecuadamente la corteza de los eucaliptos.



Fig 296 - 299: Tecnología empleada para los aprovechamientos en Portugal.

11.2.4. Obstáculos al aprovechamiento de biomasa forestal

De acuerdo con Sonia Figo, del Centro de Biomassa para a Energia (2006), los principales impedimentos para el desarrollo del mercado de la biomasa forestal en Portugal son:

- La debilidad del mercado de calefacción con biomasa.
- La falta de incentivos para la generación térmica doméstica, individual o colectiva (*district heating*).
- La falta de tradición en la gestión de residuos en el sector forestal.

Situación del aprovechamiento de biomasa forestal en Portugal, Francia e Italia

- La escasa capacidad de inversión para la adquisición de maquinaria para el aprovechamiento de biomasa.
- El mantenimiento por el Gobierno de Portugal de la exención fiscal del impuesto de productos petrolíferos para el gasóleo y el carbón empleados para producir energía.

11.2.5. Conclusiones sobre Portugal

- Las experiencias piloto (planta de Mortagua, etc.) promovidas por el sector público para estimular la demanda y motivar la producción, han sido muy útiles para el desarrollo sectorial.
- Los incentivos han resultado esenciales para la generación eléctrica o la co-combustión.
- Los principales productores de energía, tanto eléctrica como térmica, con biomasa, han sido industriales, y dentro de las industrias destacan las industrias forestales.
- Los sistemas integrados de aprovechamiento de madera y biomasa son los dominantes. El aprovechamiento de residuos de corta es más frecuente que en países próximos porque el sistema de tratamiento dominante en pinares y eucaliptares es la corta a hecho de plantaciones y también porque las condiciones montañosas de los aprovechamientos no son comunes en la mayor parte del país.
- Las tecnologías dominantes para el aprovechamiento de residuos incluyen la maquinaria forestal maderera para la saca en cortas a hecho y las astilladoras de tambor montadas sobre camión o en máquinas de orugas, semimóviles, para el astillado en cargadero.
- Las nuevas plantas eléctricas proyectadas tienen ciertas dificultades para despegar a partir de los recursos nacionales, a los niveles de incentivos actuales.

11.3. La situación en Francia

11.3.1. Contexto energético reciente: importancia de la biomasa en el consumo energético y la generación eléctrica

- Actualmente, un 4% de la energía primaria (térmica) consumida en Francia proviene de combustible forestal, esencialmente para calefacción doméstica.
- Concretamente, los combustibles derivados de la madera alcanzan un 20% de la energía consumida para el calentamiento de espacios de habitación. En volumen, esto supone un consumo anual de 35 millones de metros cúbicos, 20 millones de ellos obtenidos directamente de los bosques (básicamente, leña) y 15 millones de metros cúbicos equivalentes derivados de la industria forestal, junto con residuos y subproductos agrícolas.
- Hay cantidades muy significativas de residuos industriales (corteza, embalajes,...) que no son valorizados, y los recursos forestales no explotados son abundantes. Se estima que esta biomasa adicional que podría usarse para producción energética equivale potencialmente a 50 millones de m³ adicionales al año (equivalentes a 12 millones de tep/año).

11.3.1.1. - Política de incentivos reciente

11.3.1.1.1. - Predominio del apoyo a la generación térmica: el Programa ADEME 1999-2006

Aunque desde 1990 ha retrocedido algo la producción de energía, por descenso de la producción de calor para uso doméstico individual, las calderas de calefacción colectiva o industrial han pasado de 7 en 1990 a más de 1.700 en 2006, consumiendo casi 330.000 t de combus-

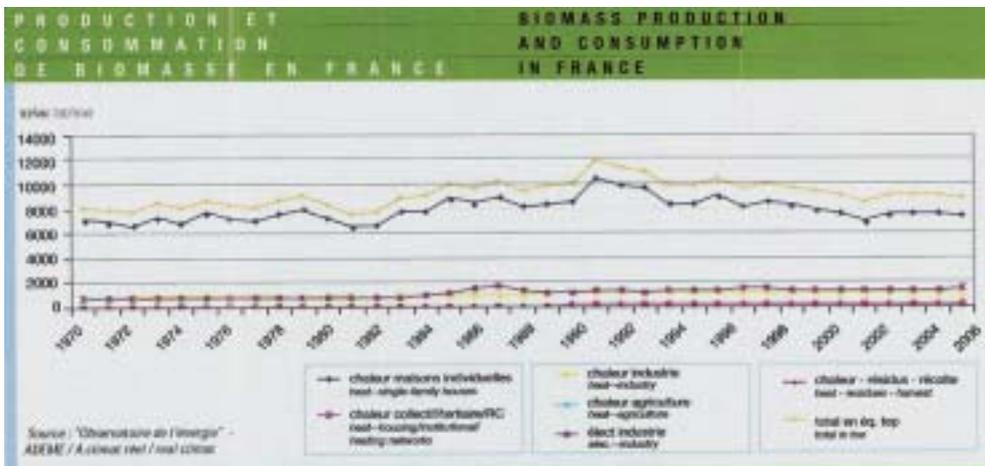


Fig 300: Producción y consumo de biomasa en Francia (tep). La línea amarilla superior es la producción total de energía, la azul corresponde a las calefacciones individuales, las líneas roja y amarilla en la parte inferior representan producciones eléctrica y térmica industriales. La línea rosa inferior, creciente, representa las calefacciones colectivas (district heating). La producción de calor agrícola (azul claro) es prácticamente inapreciable.

EVOLUTION ANNUELLE DU NOMBRE DE CHAUFFERIES BOIS			NUMBER OF NEW WOODFUEL BOILER PLANTS PER YEAR					
SECTEUR COLLECTIF ET TERTIAIRE			SECTEUR INDUSTRIEL			TOTAL		
MULTI-FAMILY HOUSING, COMMERCIAL/INSTITUTIONAL			INDUSTRIAL			TOTAL		
	No. of Boilers	Power in MW	No. of Boilers	Power in MW	Capacity in GJ	No. of Boilers	Power in MW	Capacity in GJ
1994	1	0,0	0	0	0	1	0,0	0
1995	18	0,0	5	25,0	6 000	23	31,8	6 900
1996	27	25,2	16	17,0	4 900	43	38,7	9 900
1997	36	30,6	9	5,7	700	45	26,3	7 900
1998	53	27,6	38	37,0	8 240	89	64,6	15 400
1999	70	30,8	64	77,6	18 400	134	108,4	26 300
2000	99	58,0	56	129,0	39 800	155	187,0	60 000
2001	14	18,1	40	65,0	16 740	123	83,1	22 800
2002	139	70,2	72	110,2	29 950	211	180,4	55 800
2003	210	94,4	63	72,4	17 340	273	128,8	31 940
2004	253	78,4	75	87,2	26 200	328	165,6	48 000
2005	267	14,0	66	32,0	24 000	333	146,0	42 000
TOTAL	1 253	408,4	571	609,7	190 150	1 764	1 168,0	329 540

(*) avec ajout des chaufferies installées entre 1994 et 1998 dans 11 régions de plus forte énergie et Développement local
 (*) Includes most forest systems brought into service between 1994 and 1998 inside of 11 regions affected by the "Wood Energy and Local Development" Plan

Tabla IXC: Evolución del número de instalaciones térmicas y su potencia instalada en Francia entre 1990 y 2006. A la izquierda, calefacciones colectivas; en el centro, instalaciones industriales, y a la derecha, total de calderas.

tible forestal en 2006. Las instalaciones industriales están distribuidas bastante homogéneamente en la superficie nacional, mientras que las de calefacción colectiva tienen mayor arraigo en Normandía-Bretaña y en las regiones del este y nordeste fronterizas con Alemania, Suiza y Bélgica, como se aprecia en las Figuras 300 y 301, además de en la Tabla IXC (Fuente: ADEME, 2008. “National Woodfuel Programme 2000-2006”. Activity Report).

11.3.1.1.2. Los incentivos históricos recientes a la generación eléctrica se han mantenido a bajo nivel (proyecto Biomass I en 2005)

Las medidas de incentivación se han basado en una prima estándar de 4,9 c€/kWh, y un premium de hasta 6 c€/kWh - Fuente: Riva *et al.* (CTI), 2005, Fouquet (EREF), 2007 -.

11.3.1.2. - Fuentes de biomasa explotada en Francia hasta 2006 (excluyendo la leña)

Se aprecia la distribución de fuentes de biomasa en la Tabla XC.

11.3.1.3. La situación en cuanto a calderas térmicas colectivas e industriales hasta 2006

A finales de 2006, las calefacciones colectivas multifamiliares e institucionales, alcanzaron el número de 1.743 instalaciones, proporcionando 813 MWt de capacidad instalada.

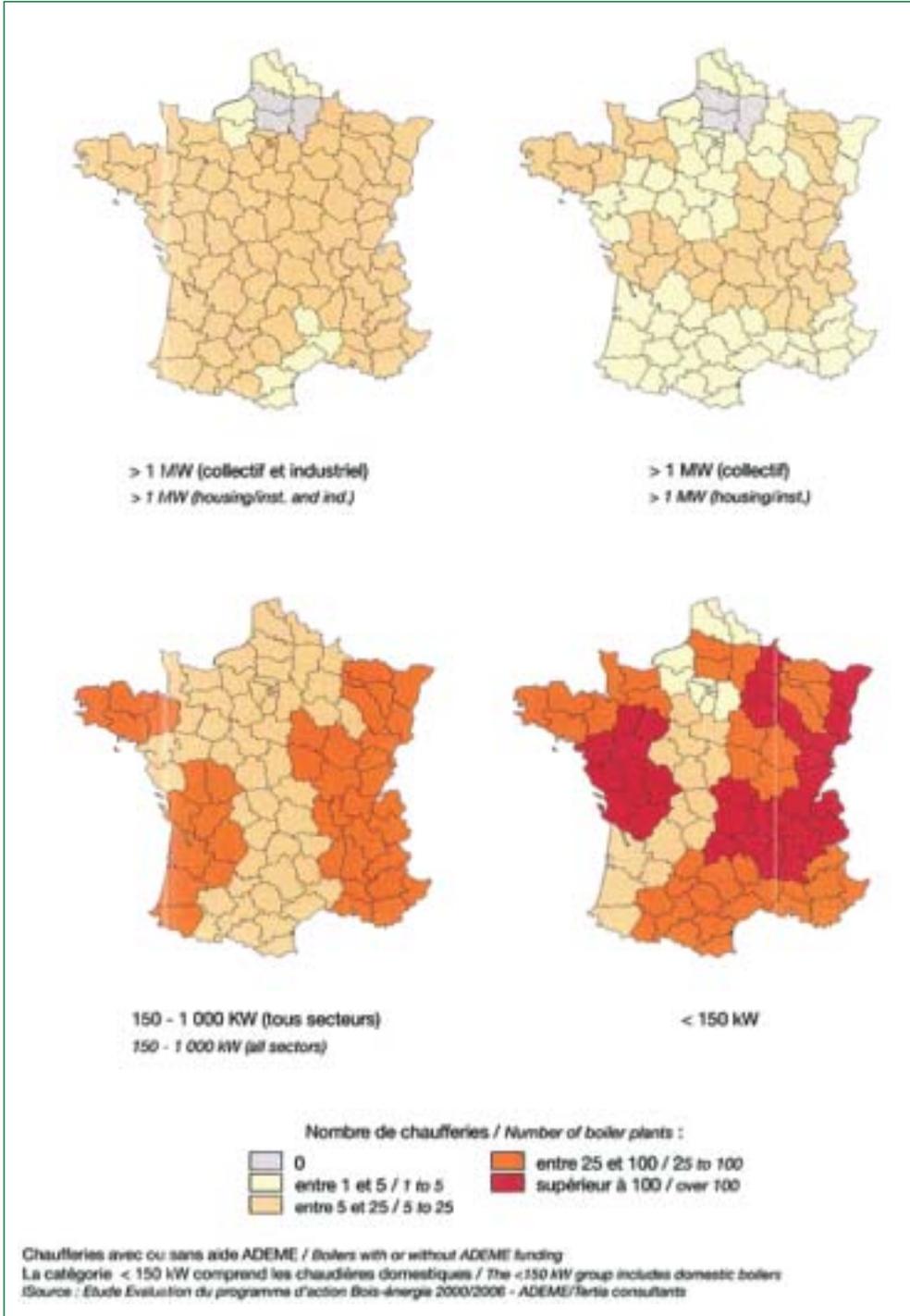


Figura 301: Distribución territorial de las calderas térmicas en Francia, en función de su potencia. Arriba, instalaciones de más de 1 MWt –a la izquierda, calor industrial; a la derecha, calefacciones colectivas -. Debajo, instalaciones de 150 kWt a 1 MWt (izquierda) e inferiores a 150 kWt (derecha).

BIOMASSE MOBILISÉE		BIOMASS EXPLOIT	
TYPE DE BIOMASSE TYPE OF BIOMASS	VOLUME MOBILISÉ VOLUME	PCI NET HEATING VALUE	EQUIVALENT ENERGIE ENERGY EQUIVALENT
MARC DE RAISIN / WINE-MAKING RESIDUES	200 000 t	2 000 kWh/t	34 400 TEP/TOE
BOUES PAPIERIERES / PAPERMILL SLUDGE	270 000 t	1 000 kWh/t	23 200 TEP/TOE
LIQUEURS NOIRS / BLACK LIQUOR	1 000 000 t	3 800 kWh/t	327 000 TEP/TOE
PLAQUETTES FORESTIERES / FORESTRY CHIPS	600 000 t	3 000 kWh/t	154 900 TEP/TOE
ECORCES, SERRIN, DIB / BARK, SAWDUST, NON-HAZ. IND. WASTE	800 000 t	2 500 kWh/t	172 100 TEP/TOE
TOTAL / TOTAL	2 870 000 t		712 000 TEP/TOE

Source: CNE

Tabla XC: biomasa movilizada en Francia. De arriba abajo, residuos de viñedos, residuos de fábricas de papel, licores negros, astillas forestales y corteza, serrín y otros residuos industriales no peligrosos (Fuente: Ademe, 2008. National wood fuel programme 2000 2006. Activity report. p 154).

Las calderas industriales de capacidad instalada superior a 1 MWt se estiman en unas 1.000 instalaciones, en su mayor parte de la industria de madera y celulosa, representando una capacidad total instalada del orden de 2.5 GWt (Fuente: ADEME/Arthur Andersen, junio de 2001).

Esta capacidad industrial se caracteriza por concentrarse en unas pocas grandes plantas en la industria de la celulosa. En su mayoría, son plantas de cogeneración, produciendo calor para uso local (necesidades térmicas de proceso) y/o generan electricidad que se consume localmente o, con mayor frecuencia, alimenta la red eléctrica nacional.

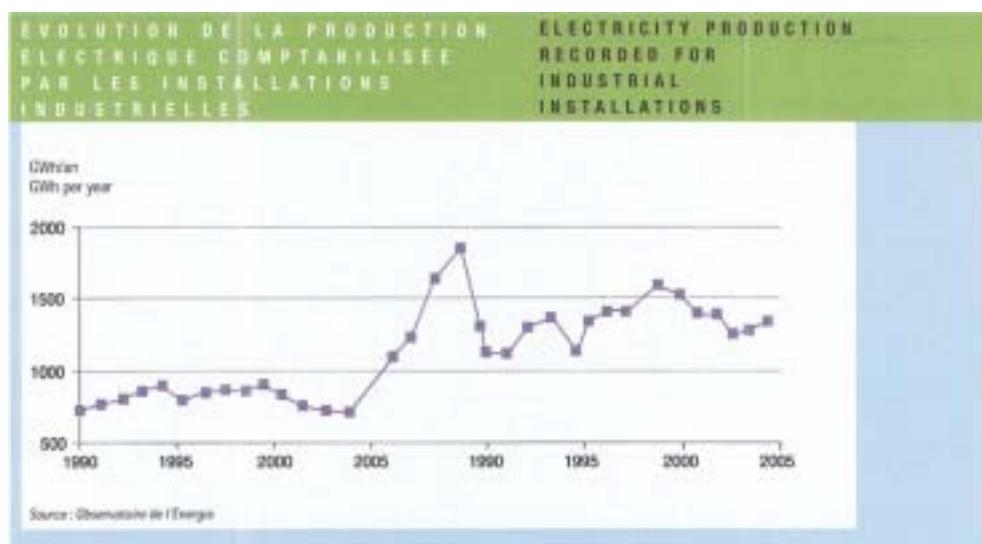


Figura 303: Producción de electricidad registrada en instalaciones industriales consumidoras de biomasa forestal en Francia

11.3.1.4. Producción de electricidad en calderas industriales hasta 2006

Se aprecia la evolución entre 1990 y 2005 en la Figura 303 (Fuente: ADEME, 2008. “National Woodfuel Programme 2000-2006”. Activity Report.)

11.3.1.5. Proyectos de plantas eléctricas como consecuencia del programa “Biomass I” (2005)

Hay 14 proyectos en desarrollo, aunque a comienzos de 2007 sólo una instalación estaba en funcionamiento (concretamente, la operada por el grupo forestal finlandés UPM – Kymmene)

En total, los proyectos de este plan suponen 216 MWe y 2.870.000 t de biomasa utilizada en total (de las cuales se estima que 600 000 t serían astillas de origen forestal no industrial).

El mapa de las instalaciones proyectadas se muestra en la Figura 304, en la que se representan en color marrón rojizo las instalaciones basadas en astillas y otros combustibles de origen forestal, que se concentran en dos áreas del macizo central francés y del noreste del país.

11.3.2. Situación actual y perspectivas del uso energético de la biomasa forestal en Francia

Se plantean nuevos objetivos para las aplicaciones térmicas, mediante el Programa “Calor Renovable 2007 – 2010”

Este programa, bajo la coordinación de ADEME, se dirige a proyectos grandes o familias de proyectos asociados de menor escala. Se considera que, dado el creciente número de proyectos basados en biomasa leñosa, es necesario optimizar los recursos humanos y financieros, que el desarrollo de estos combustibles requiere un acceso más amplio a indicadores que permitan los planteamientos estratégicos, que se detecta una necesidad de acciones nacionales y regionales para mejorar la calidad ambiental global de los procesos energéticos basados en estos combustibles, así como de un sistema de monitorización abierto a los usuarios regionales y que posibilite una gestión adaptativa de los proyectos.

En cuanto a la producción eléctrica, los objetivos de los proyectos del Plan “Biomass II” se centran en una segunda convocatoria pública abierta a proyectos de menor tamaño (siempre dentro de la categoría de más de 5 MWe de capacidad instalada). Se estima que esta segunda convocatoria ofrece una gran oportunidad para el desarrollo de la bioenergía en Francia.

Los proyectos aceptados del Plan “Biomass 2” (2008) hasta junio de 2008 supusieron 22 instalaciones, con una potencia instalada total de 314 MWe, cuya distribución se muestra en la Figura 304, en que también aparecen en color marrón rojizo las instalaciones basadas en astillas de origen forestal, que tienen una distribución más amplia que en el precedente Plan Biomass I.

El suministro de biocombustible para estas instalaciones se toma en consideración en los proyectos.

Para el 60 % de ellas, según los proyectos el suministro se basaría en productos o sub-

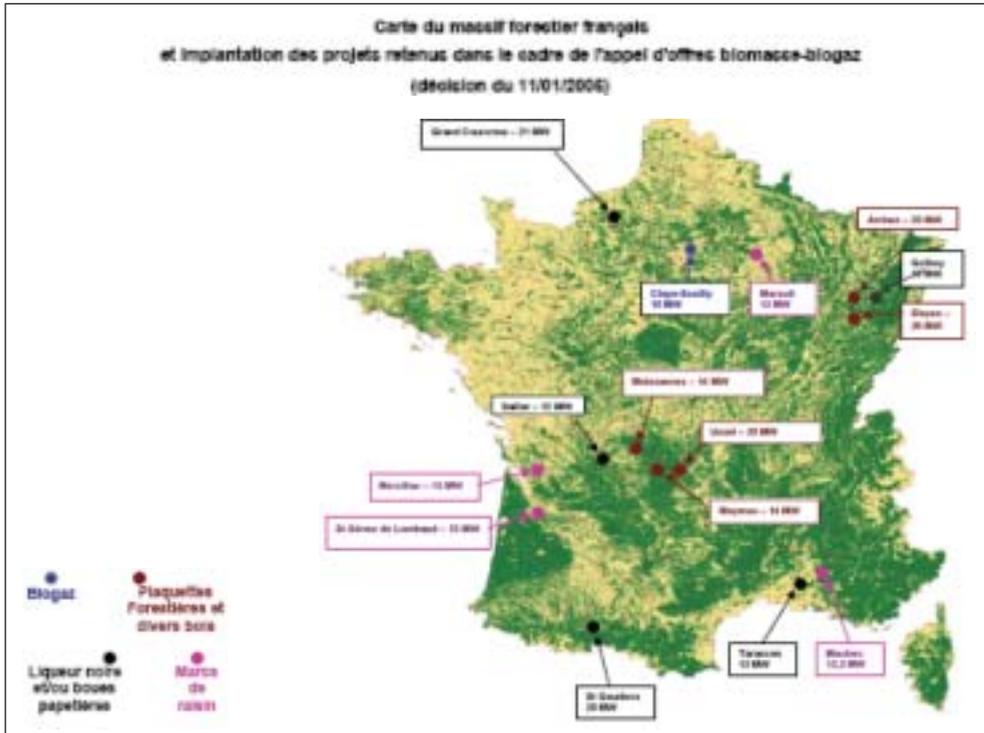


Figura 304: Proyectos e instalaciones de producción eléctrica con biomasa como consecuencia del Plan "Biomass I" (2005)

productos de la silvicultura o las industrias de la madera o la celulosa (astillas forestales, residuos forestales, corteza, licores negros, subproductos de serrerías, subproductos no tóxicos de otras industrias forestales).

Para el 30 % de ellas, de acuerdo con los proyectos, los biocombustibles serían productos y subproductos de la agricultura y de la industria agroalimentaria (paja, residuos de cultivos, residuos de la industria alimentaria).

En el restante 10%, se combinarían los dos tipos de fuente descritos en parecidas proporciones.

11.3.3. Tecnologías empleadas para el aprovechamiento de biomasa en Francia

La principal tecnología empleada para la producción de combustibles forestales (excluyendo la leña de uso doméstico) es el astillado en cargadero.

Las astillas forestales pueden venir de árboles completos de primeras claras (de masas alejadas de las industrias de la madera), de residuos de cortas de regeneración (ramas, copas y tocones, aunque esta última fuente es objeto de ensayos), o de madera proveniente de desastres (de incendios, problemas sanitarios, derribos por viento). Actualmente, no se sabe con certeza la proporción de cada una de esas fuentes en las astillas forestales consumidas.

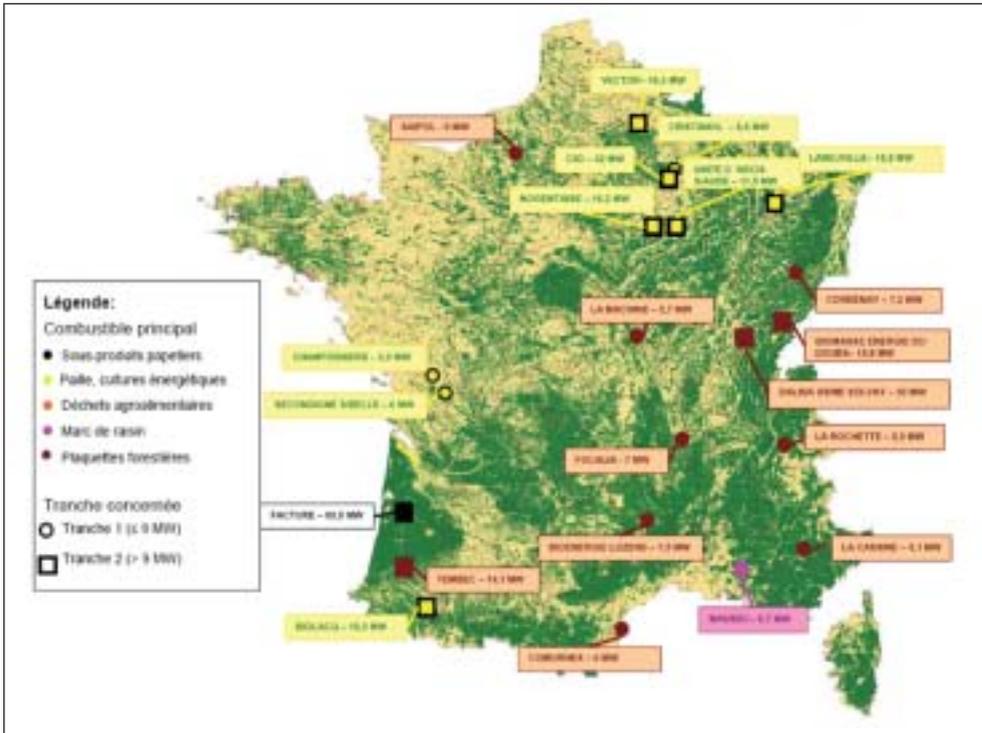


Figura 305: Instalaciones aprobadas hasta junio de 2008 dentro del Plan Biomass 2 de promoción de la generación eléctrica con biomasa.

Se desarrollan actividades de investigación sobre las tecnologías de aprovechamiento:

- Actualmente, hay varios experimentos sobre empaquetado.
- El FCBA (El “Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement”, nacido de la fusión de los precedentes AFOCEL y CTBA) trabaja en un proyecto piloto sobre biorrefinerías, que trata de la posibilidad de usar ramas y tocónes para producir diversos biocombustibles.
- Además, hay diversas experiencias sobre cultivos energéticos de turno corto (sauce, chopo, eucalipto,...).
- Otros experimentos dignos de mención se refieren a la gestión de masas forestales “semi-dedicadas” a la producción de biomasa, con experimentación sobre pino pinaster. Las plantaciones se están ensayando a doble densidad (2.500 pies/ha), y se lleva a cabo un clareo a los 8 años para producción de energía, llevando a la masa a densidades “normales” para producción de madera (1.250 pies/ha).

11.3.4. Conclusiones sobre Francia

- La tradición histórica, junto a un nivel bajo de incentivos a la producción eléctrica han conducido a un dominio amplio de las aplicaciones térmicas, especialmente para ca-

Situación del aprovechamiento de biomasa forestal en Portugal, Francia e Italia

lefacción doméstica. La leña en uso residencial domina ampliamente la producción de energía primaria.

- Los principales productores de energía eléctrica a partir de biomasa son también, como en Portugal, las industrias forestales.
- El aprovechamiento de biomasa forestal no está aún bien desarrollado. Los sistemas selvícolas usuales, el coste de la mano de obra y las condiciones montañosas son los principales factores limitantes.
- Las tecnologías más comunes para el aprovechamiento de biomasa de origen en los montes son sistemas integrados con los de aprovechamiento maderero. Los medios más empleados son máquinas forestales para la saca de árboles completos en claras, de ramas y copas en cortas finales o de madera dañada por incendios, plagas o derribos.
- La principal tecnología de transformación de la biomasa se basa en el astillado en cargadero empleando astilladoras de tambor.
- Las nuevas plantas de generación eléctrica recientemente proyectadas se encuentran también con dificultades de despegar empleando sólo recursos forestales nacionales. Este hecho no se puede achacar a su escasez, sino a las dificultades orográficas, la falta de tradición en la mecanización o los sistemas de corta selectivas que predominan, que dificultan el aprovechamiento mientras se mantengan los actuales bajos niveles de incentivación.

11.4. La situación en Italia

12.4.1. Contexto energético reciente: importancia de la biomasa en el consumo energético y la generación eléctrica

En 2006, 1.810 millones de tep provinieron de biomasa sólida en Italia (0,031 tep/habitante). El consumo de leña se estima por encima de los 4 millones de toneladas verdes equivalentes por año, en su mayoría quemadas en estufas u hornos tradicionales de alimentación manual.

En cuanto a la producción de energía eléctrica con biomasa, Italia alcanzó en 2006 la considerable cifra (en comparación con el entorno estudiado) de 2,493 TWh, de los cuales 1,513 provenían de plantas de generación solamente, mientras que los restantes 0,979 se producían en plantas de cogeneración (en total, un 2% de la producción bruta de electricidad).

Fuentes:

Systèmes Solaires – Le Journal des Énergies Renouvelables n° 182 – 2007: Solid Biomass Barometer – December 2007,

Raffaele Spinelli – CNR/IVALSA, 2007: Chapter 1: “Biomass, LAGs and the transnational project”. In Gaio, Da Val and Carrara (Coord.), 2007. “Guidelines for the development of a forest chips supply chain model”, and

Italy: Renewable Energy Fact Sheet. European Union, January 2008

11.4.2. Política de incentivos en la época reciente

Los principales incentivos se han dirigido a la generación eléctrica:

- Los subsidios, muy generosos, para la generación de electricidad, han supuesto una fuerza motriz básica para la construcción de centrales eléctricas, independientemente de la disponibilidad de biomasa y de la eficiencia (reducida) de la conversión con las tecnologías actuales. Estaban en funcionamiento, en 2007, 32 centrales con una potencia instalada total de cerca de 400 MW eléctricos.
- El enfoque centralizado (grandes centrales tratando de gestionar el suministro de grandes cantidades de combustible), favorecido por la gestión de los proyectos por la industria, hace obligado un esfuerzo logístico muy considerable en los aspectos de suministro. Las dificultades han conducido al recurso generalizado a la importación de biocombustibles industriales (astillas de residuos industriales, pellets,...).
- Otro enfoque que también está presente, aunque con menor importancia, es el de las redes de pequeñas plantas, donde la generación térmica es la única opción viable (centrales de calefacción colectiva para urbanizaciones de pequeño a mediano tamaño). Hay más de 50 plantas de calefacción colectiva con una producción correspondiente a una capacidad total instalada de unos 200 MW térmicos.

Fuente: Raffaele Spinelli – CNR/IVALSA, 2007: Chapter 1: “Biomass, LAGs and the transnational project”. In Gaio, Da Val and Carrara (Coord.), 2007. “Guidelines for the development of a forest chips supply chain model”.

11.4.3. Situación actual y perspectivas

En las plantas eléctricas, la mayor demanda y los elevados incentivos han conducido a la importación común de biocombustibles sólidos, subproductos industriales o residuos de madera de otros países, como se aprecia en el gráfico de la Figura 306, que se refiere a las plantas de cogeneración en el noroeste de Italia, según Spinelli (2007). Por el contrario, las plantas de calefacción colectiva dependen más del aprovechamiento de biomasa forestal en los bosques locales.

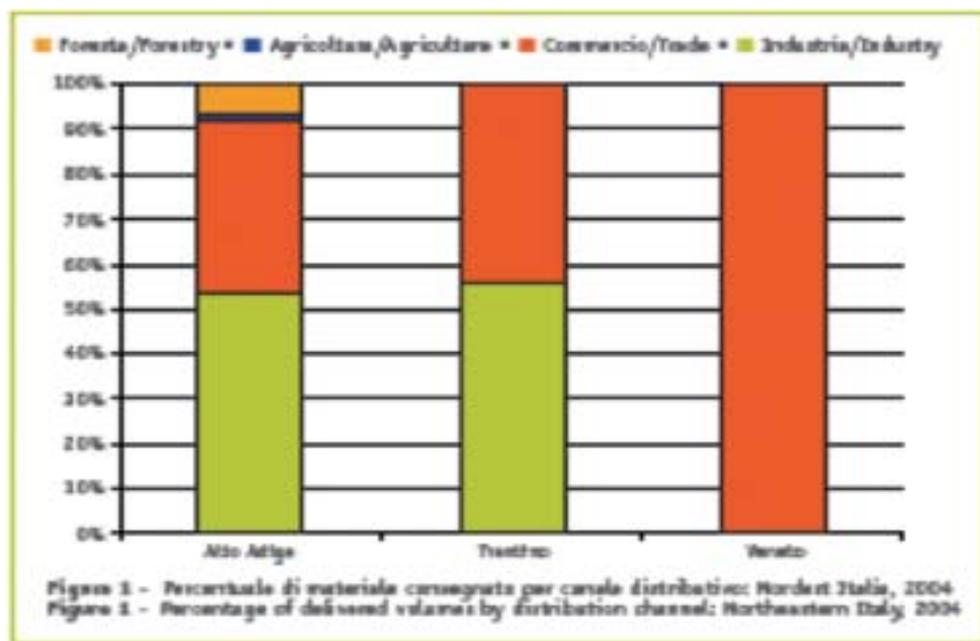


Figura 306: Proporción de combustibles empleados en las plantas de cogeneración de tres regiones del noroeste italiano: el color verde representa los residuos industriales, el naranja oscuro los biocombustibles importados, el naranja claro los de origen forestal y el azul, los de origen agrícola.

Como otro ejemplo que describe la situación en el norte de Italia, se presenta la *Tabla XCI*, en que se aprecia la mayor demanda de combustible para uso eléctrico (10.000 t verdes/año por MW instalado eléctrico) frente al uso térmico (1.080 t verdes/año por MW térmico instalado). Esto no sólo se debe a la mayor eficiencia térmica –frente a la eléctrica–, sino también al mayor uso horario de la potencia instalada en las aplicaciones eléctricas.

De acuerdo con Spinelli (2007), las perspectivas el sector energético basado en biomasa de origen forestal en Italia son las siguientes:

Las grandes centrales han orientado sus demandas a los subproductos industriales. La proliferación de plantas de biomasa en toda Europa puede cambiar esa situación, dado que las reservas de residuos industriales son limitadas y pueden agotarse pronto, lo que podría obligar, en teoría, a prestar atención a los recursos forestales primarios.

De hecho, la experiencia del pasado puede conducir a formularse otras alternativas como

Regionme/ Region	Riscaldamenti collettivi/ Collective heating plants			Centrali elettriche/ Power stations		
	n°	MWt	t/anno/ t/year	n°	MWo	t/anno/ t/year
Valle d'Aosta	2	16	17.920	-	-	-
Piamonte	4	24	26.850	3	27	270.000
Lombardía	3	35	39.200	4	30	300.000
Veneto	3	2	2.240	2	23	230.000
Trento	2	17	19.040	-	-	-
Bolzano	30	107	119.840	-	-	-
Friuli V.G.	1	0,5	560	1	3	30.000
Emilia-Romagna	-	-	-	1	23	230.000
Toscana	7	3	3.360	2	24	240.000
Total	50	204	229.040	13	130	1.300.000

Tabella 1 - Ri9scaldamenti collettivi o centrali elettriche nell'Italia Centro-Settentrionale (2007).
Tabla 1 - Colloective heating plants and power stations in Nothern Italy (2207).

Tabla XCI: Instalaciones de calefacción colectiva y centrales eléctricas con biomasa en el norte de Italia (2007) Fuente: Raffaele Spinelli – CNR/IVALSA, 2007: Chapter 1: “Biomass, LAGs and the transnational project”. En Gaio, Da Val and Carrara (Coord.), 2007. “Guidelines for the development of a forest chips supply chain model”

más probables. Las industrias de la madera italiana y británica representan sectores transformadores que han preferido recurrir a las importaciones a desarrollar una cadena de suministro forestal eficiente, basada en sus recursos nacionales. Las mismas condiciones que han hecho optar por esa elección a las industrias de la madera pueden motivar al sector energético basado en la biomasa forestal a seguir el mismo camino.

330

Existe una necesidad de apegar la conversión energética al territorio y sus recursos. Este objetivo se puede conseguir a través de una red descentralizada de pequeñas plantas, probablemente de calefacción. Este modelo implicaría una comunicación más fácil con los actores socioeconómicos locales y, por ello, tendría un potencial mayor de integración de la cadena de suministro. En este mismo sentido, las tecnologías futuras de gasificación, más eficientes que la combustión para la generación eléctrica, pueden jugar también un papel decisivo.

Fuente: Raffaele Spinelli – CNR/IVALSA, 2007: Chapter 6: “Conclusions”. En Gaio, Da Val and Carrara (Coord.), 2007. “Guidelines for the development of a forest chips supply chain model”.

11.4.4. Tecnologías aplicadas para el aprovechamiento de biomasa en Italia

La principal tecnología empleada para producir astillas de origen forestal es el astillado en cargadero o borde de pista y, en menor medida, el transporte de la biomasa bruta para ser astillada en la central o en una terminal logística.

Se presentan algunas recomendaciones sobre estrategias y costes del aprovechamiento, a partir de Spinelli (2007). Estas recomendaciones se refieren al caso italiano, pero son perfectamente extensibles a la mayor parte de las masas forestales francesas, españolas o portuguesas, tal vez excluyendo únicamente las plantaciones sujetas a una silvicultura más intensiva y en terrenos llanos:

Si las centrales eléctricas ofrecen de 40 a 45 €/tonelada verde de astillas, el aprovechamiento de astillas de origen forestal solo es económicamente viable bajo condiciones especiales, en las que el astillado se conciba como forma obligada de gestión de los residuos o las condiciones de aprovechamiento sean muy favorables. Hoy por hoy, el aprovechamiento de astillas solo puede concebirse como parte de una estrategia de aprovechamiento integrado cuyo fin sea maximizar el valor añadido conjunto de los productos aprovechados y reducir los costes globales de producción.

A 40 €/tonelada verde, solo se puede producir astillas de forma rentable si las ramas y copas están acumuladas en un cargadero, después de una extracción de árboles completos, o si parte de los costes de su extracción son cubiertos por otras fuentes. Este hecho articula un sistema de producción muy complejo, cuyos resultados son difíciles de prever.

Los actuales precios de mercado permiten cubrir solo aquellas operaciones donde la obtención de astillas de origen forestal sea una actividad secundaria, que se desarrolle colateralmente a un proceso productivo principal.

Las condiciones no permiten que la producción de astillas financie muchos tratamientos, reemplazando a las ayudas destinadas hasta el momento a la gestión forestal, o no completamente. Pero la producción de astillas permite reducir el coste, en el caso de los clareos, a un tercio del coste habitual con los sistemas tradicionales.

Incluso con un precio de 60 €/tonelada verde, las masas situadas sobre pendientes abruptas o con diámetros normales por debajo de 20 cm hacen inviable la producción rentable de astillas forestales: la recolección de ese material requeriría un incremento mayor de los precios o una estrategia integrada.

Por todo ello, a la hora de diseñar una cadena de suministro de astillas de origen forestal, la integración es el concepto clave.

La extracción de árboles completos, seguida de su procesado en cargadero permite el uso de equipos mecanizados que no pueden acceder al interior de las masas, y cuya utilización reduce los costes de aprovechamiento en al menos un 30%. Ese tipo de sistemas y medios no se han utilizado, con frecuencia, por los problemas a que daría lugar la acumulación de residuos en los cargaderos, un problema que puede soslayarse si se producen astillas.

El aprovechamiento de astillas requiere a menudo el cambio de los sistemas tradicionales de aprovechamiento, y conlleva una reorganización general de las operaciones. Entrar a las masas, tras un sistema tradicional de “madera corta”, para recolectar los residuos desperdigados sobre el terreno es una estrategia perdedora que no rinde ningún beneficio. Por el contrario, la mejor manera de proceder consiste en extraer los árboles completos y procesar-

los en el cargadero, o astillarlos enteros si son demasiado pequeños para producir madera. Es un caso particular del principio general de que se debe reducir al mínimo la manipulación reiterada de los productos forestales.

La mecanización del apeo y procesado es el prerrequisito para que el aprovechamiento integrado de madera y astilla pueda resultar eficiente desde el punto de vista de los costes.

En cuanto a las astilladoras, cuanto más potente sea la máquina menores serán los costes de astillado, y este principio se cumple a lo largo de todo el rango de potencias. Varias centrales tienen en Italia su propia astilladora estacionaria, lo que permite una reducción muy importante de los costes de astillado. Las plantas de calefacción colectiva no manejan tanto material para poder utilizar de forma individual estos equipos, por lo que se puede recurrir a una máquina en un terminal logístico que de servicio a varias plantas, o muchas veces la mejor opción es una astilladora grande pero montada sobre un camión, lo que es a la vez productivo y móvil.

Es conveniente subcontratar el astillado a una empresa especializada si el tamaño de la planta de calefacción no es suficiente para amortizar una astilladora potente. Este contrato debería hacerse de forma coordinada con otras plantas en la misma comarca.

La calidad de los combustibles en un aspecto clave para las plantas de calefacción. Las astillas industriales de precios moderados provienen del procesado de árboles completos o ramas secados al aire, y pueden presentar una distribución irregular de los tamaños de partículas y un contenido en humedad cercano al 40%. Las plantas diseñadas para trabajar con biomasa forestal deben ser capaces de aceptar este tipo de material, o contemplar en sus previsiones los costes extra de su refinado.

La subcontratación del suministro y el transporte a compañías de cierto tamaño puede ser la clave de una logística de transporte y secado eficientes, empleando tecnologías de SIG y GPS, aplicando pretratamientos en terminales logísticas y otros procedimientos orientados a obtener una mayor calidad de los combustibles.

Algunas de las máquinas y estrategias propuestas se presentan en las fotografías de la Figura 307.

11.4.5. Conclusiones sobre Italia

- Los máximos niveles de incentivación a la producción eléctrica con biomasa han conllevado a una red densa de centrales eléctricas y, en menor medida, de cogeneración, basadas en la biomasa.
- La demanda elevada y estable de biomasa por los productores de electricidad no ha llevado a un incremento notable en los aprovechamientos locales de biomasa forestal, sino al recurso generalizado a la importación de biocombustibles. Además, los tratamientos selvícolas habituales y las condiciones montañosas frecuentes son en Italia aún más limitantes que en Portugal o la mayor parte de Francia.
- Las instalaciones térmicas son –o pueden ser– más dependientes de los recursos forestales locales.
- El concepto clave en el aprovechamiento de biomasa forestal es la integración con el aprovechamiento maderero. La mecanización y la extracción de árboles completos de claras o cortas selectivas son las estrategias de suministro recomendadas por los



Figura 307: Ejemplos de maquinaria asociada a los sistemas integrados de producción de astilla siguiendo al aprovechamiento de árboles completos

expertos. La logística coordinada con otros consumidores es otra clave para el suministro eficiente a plantas de calefacción.

- Las tecnologías de aprovechamiento y procesado de la biomasa están también basadas en el astillado en cargadero o borde de pista empleando astilladoras potentes, de tambor, montadas en camión y, en menor medida, en el astillado en planta o terminal logístico empleando astilladoras estacionarias de mayor tamaño.

11.5. Conclusiones generales sobre la situación del sector de la biomasa forestal en los países analizados

1.- La situación de los tres países analizados se representa en el siguiente cuadro resumen (*Tabla XCII*):

País	Ayudas producción eléctrica	Apoyo a la biomasa térmica	% energía primaria con biomasa (2007, Mtep, %)	% producción eléctrica con biomasa (2007, TWh, %)	Estado del aprovechamiento de biomasa forestal no industrial
Portugal	Medio (11 c€/kWh)	Medio	2,790 Mtep (10,8 %)	1,532 TWh, (3,5)	Bueno para la leña y uso térmico –medio– En desarrollo para electricidad
Francia	Bajo (7,1 c€/kWh)	Alto	9,234 Mtep (3,3%)	1,390 TWh, (0,25%)	Bueno para la leña y uso térmico Bajo en electricidad
Italia	Muy alto (20 c€/Kwh., pasa a 28 c€)	Medio-Alto	2,030 Mtep (1,1%)	2,482 TWh (0,92%)	Bajo para electricidad Localmente medio, especialmente para leña y uso térmico

Tabla XCII: Resumen de la situación de incentivos y aprovechamiento energético de la biomasa forestal en Portugal, Francia e Italia.

El país con mejores resultados en cuanto a aprovechamiento de sus recursos forestales sería Portugal (la elevada producción eléctrica italiana se debe a la importación de biomasa sólida y otros biocombustibles).

Esto se debe a factores internos (tradicción cultural en uso de leñas, abundancia de plantaciones productivas de especies de crecimiento rápido en terrenos accesibles, etc.), pero también a una promoción equilibrada de la demanda, evitando las primas excesivas e incluyendo, en el aspecto de producción eléctrica o cogeneración, la implicación de la Administración en proyectos piloto y la planificación a través de concursos públicos de nuevas centrales, a las que se ha exigido un plan de suministro.

En Francia, la situación de la energía térmica es positiva en cuanto a la promoción de instalaciones industriales y colectivas, aunque el uso térmico global sigue descendiendo lentamente por descenso en el uso doméstico de las leñas – que sigue siendo muy fuerte, por tradición nacional -. En todos los casos, sería positivo aumentar los incentivos a la producción de biomasa no industrial, especialmente en montes con una silvicultura no intensiva y/o en áreas de montaña.

2.- Estos hechos conducen a concluir que **los incentivos públicos para la producción eléctrica a la demanda de biomasa de origen forestal son estrictamente necesari-**

rios, especialmente en forma de primas al kWh eléctrico producido. **Son también muy útiles las iniciativas de demostración, apoyando o promoviendo desde la Administración proyectos de centrales o terminales logísticos. Los incentivos al uso térmico, aunque sean sólo indirectos o afectando a los costes de instalación, son también muy convenientes.**

- 3.- **La elevada demanda de materia prima por las plantas eléctricas, debida a niveles excesivos de incentivación a la demanda de biomasa (primas muy elevadas al kWh eléctrico) puede conducir a la importación de biocombustibles, en vez de estimular el aprovechamiento de biomasa forestal.** Además, las instalaciones sólo eléctricas son energéticamente muy poco eficientes, siendo preferibles en todo caso las de cogeneración. Frente a la producción eléctrica, **las instalaciones térmicas – industriales o de calefacción colectiva – pueden ser más dependientes de los recursos locales, favoreciendo así la gestión forestal sostenible.**
- 4.- **Los principales factores limitantes al aprovechamiento de biomasa de origen forestal son los costes elevados, la falta de integración de los sistemas de aprovechamiento de astillas con los tradicionales sistemas de aprovechamiento maderero y la falta de mecanismos de abastecimiento homogéneo y estable.**
- 5.- **Los elevados costes de aprovechamiento están directamente relacionados con la escasa producción de biomasa por hectárea en los tratamientos selvícolas selectivos, las condiciones montañosas y los aprovechamientos no mecanizados.** Por tanto, las áreas de plantaciones que se tratan mediante cortas a hecho en países como Portugal o las zonas menos abruptas de la cornisa cantábrica española tienen ventaja competitiva a ese respecto, mientras que **las cortas de mejora selectivas, especialmente en terrenos complicados, pueden requerir ayudas directas específicas a la producción (ayudas a la oferta de biomasa), complementarias a las ayudas a la demanda** que representan las primas al kWh eléctrico o las ayudas para las calderas térmicas.
- 6.- **Los conceptos claves en al aprovechamiento de biomasa forestal son la mecanización y la integración con los aprovechamientos de madera.** Después del apeo mecanizado y el apilado de biomasa, la extracción de residuos en cortas finales, o de árboles completos tanto en cortas finales como en claras, son los sistemas que se han mostrado más eficaces para el aprovechamiento en el área de referencia.
- 7.- **Las tecnologías para el procesado de la biomasa que se han mostrado más adecuadas a las condiciones de los países estudiados se basan generalmente en el astillado en cargadero o borde de pista con astilladoras potentes de tambor montadas en camiones, o en menor medida en el astillado en planta o terminal logística con astilladoras estacionarias de mayor potencia.**
- 8.- **Las estrategias de logística compartida y subcontratación del astillado y suministro pueden ser otros aspectos esenciales para el abastecimiento eficiente,** particularmente en instalaciones de calefacción, dada su menor escala.
- 9.- Otras alternativas de obtención local de biomasa (aprovechamiento de tocones, empaçado, cultivos energéticos de turno corto, etc.) son objeto de investigación, sin encontrarse aún implantados en una escala industrial.

11.6. Conclusiones sobre los incentivos al uso energético de la biomasa de origen forestal

Habida cuenta de la política energética de la U.E. y de los compromisos con Kyoto, y teniendo en cuenta que los costes actuales de la recogida y utilización de biomasa forestal residual están por encima de los precios de mercado de la energía, la incentivación al uso energético de la biomasa forestal, al igual que en el caso de otras renovables, es una necesidad perentoria.

No obstante, se plantean diversas opciones en la instrumentación de los correspondientes incentivos, que pasan a analizarse a continuación, a la vista de las realidades españolas y de la experiencia en los países europeos cercanos, en lo que se refiere a los instrumentos de incentivación del uso energético de la biomasa forestal con origen en los montes (es decir, la que se suele llamar de forma un tanto equívoca “biomasa forestal residual”).

11.6.1. - Incentivación a la demanda de biomasa

11.6.1.1. Incentivación a la demanda de biomasa para uso térmico.

El uso térmico de la biomasa forestal ya es rentable, en términos comparativos con los combustibles fósiles alternativos, aunque se encuentra con los siguientes **obstáculos**:

- Necesidad mayor de inversión en calderas de biomasa respecto a las alternativas de fuel o gases. A este inconveniente inicial se une la mayor necesidad de espacio para el almacenamiento de combustible, que puede suponer un problema, especialmente en los medios urbanos.
- Desconocimiento por parte del público en general de las ventajas del uso de biocombustibles sólidos de origen forestal (astillas, pellets). Existe incertidumbre, en primer lugar, sobre los agentes de distribución y su garantía de regularidad y, en segundo lugar, sobre las previsiones futuras de precios.
- Falta de demanda en algunas áreas geográficas para el principal uso de esta energía térmica, la calefacción residencial. En la España mediterránea puede ser necesario buscar otras fuentes de demanda para completar los escasos meses fríos, llegándose al límite de localidades en que no se usa calefacción ningún mes.
- Falta de capacidad logística, por la pequeña escala de las instalaciones, que tiene que adquirir combustibles ya elaborados. Las características de las instalaciones hacen, además, que sus requerimientos en calidad de los combustibles – humedad baja, homogeneidad, bajo contenido en cenizas, etc.– sean elevados, por lo que algunos biocombustibles de origen forestal no son utilizables sin un procesado posterior al suministro desde los montes (molido, refinado, etc.).

De acuerdo con ellos, las principales **medidas de incentivación de la demanda** son las siguientes:

- **Ayudas a la inversión para la instalación de calderas:** existen en la mayor parte de las Comunidades Autónomas, alcanzando con frecuencia el 50% de la inversión o valores cercanos. Es recomendable mantener este tipo de ayudas y hacer publicidad sobre su existencia.
- **Campañas de promoción** de este tipo de alternativas para calefacción, incluyendo

foros en que las empresas puedan presentar sus ofertas de mantenimiento y servicio integrales (hoy en día, la mayor parte de los instaladores ofrecen además contratos de suministro). Aunque este tipo de campañas existen en ciertas Comunidades Autónomas y a escala estatal, sería importante reforzarlas, dado que su penetración en la opinión pública no parece suficiente.

- **Proyectos de demostración**, consistentes en la instalación de calderas en edificios institucionales (esuelas, polideportivos, instalaciones administrativas, etc.). Es cada vez más frecuente en ciertas Comunidades (Cataluña, Navarra, Castilla y León,...), lo que se ve favorecido por el coste moderado de estas instalaciones en comparación con las de generación eléctrica o cogeneración. Estas iniciativas deben mantenerse o reforzarse, incrementándose la información sobre ellas al público.
- **Inclusión de este tipo de instalaciones, para ciertas regiones y edificaciones, en las normas de edificación**. Se echa de menos una mayor promoción en la normativa frente a otras renovables como la solar térmica.
- **Favorecer los proyectos de elaboración de combustibles forestales** (plantas de pelletización, operadores logísticos capaces de secar, moler, clasificar y distribuir materias primas biomásicas forestales, etc.).

11.6.1.2. Incentivación de la demanda de biomasa para uso eléctrico o de cogeneración

Este uso sí **requiere una incentivación directa a la producción de energía** con esta fuente, dado que hoy por hoy no resulta rentable por sí sola. Las principales **dificultades** con que se encuentra son las siguientes:

- Rendimiento muy bajo de la generación eléctrica y acusada economía de escala. Las plantas de generación eléctrica por combustión directa de biomasa tienen rendimientos que no superan el 30%. Además, las plantas de escasa potencia instalada tienen un coste de instalación y un rendimiento muy reducido, lo que las hace inviables.
- Necesidades elevadas de materia prima, por el poder calorífico y densidad relativamente reducidos de los combustibles forestales. Se requiere un abastecimiento de unas 10.000 t de astillas secas al aire al año por MW instalado. La dificultad de asegurar un abastecimiento de materia prima estable es el principal motivo de incertidumbre en la instalación de este tipo de centrales, lastrando su virtualidad financiera.
- Las plantas de potencias medias y tecnologías convencionales de combustión son, además, exigentes en calidad de la astilla, viéndose su rendimiento muy perjudicado por la humedad elevada, falta de homogeneidad, presencia de impurezas –especialmente hojas o acículas, por su contenido en álcalis, también sílice procedente de la arena o cenizas más abundantes en las cortezas, etc.–.
- Coste elevado de la instalación, que agrava los problemas anteriores.

Las principales **medidas de fomento de la demanda** en el aspecto de la generación eléctrica son las siguientes:

- **Incentivación directa de la producción a través de primas o precios regulados al kWh producido**, como ocurre en distintos niveles en todos los países analizados (y en España). Es una forma de incentivación final (sobre el objetivo perseguido), fácil

de establecer y controlar, además de efectiva, especialmente si se superan ciertos límites. Tiene el inconveniente de que **puede hacer, como en el caso italiano, que los demandantes acudan a la importación de biocombustibles**, con lo que los efectos deseables sobre los recursos propios (desarrollo rural, prevención de incendios, fomento de la gestión forestal sostenible, etc.) no se produzcan, salvo que se empleen otros instrumentos complementarios.

- **Desarrollo promovido por el sector público de proyectos piloto.** Se ha mostrado muy eficaz en algunas ocasiones, a pesar de problemas de diseño u otros (por ejemplo, en Mortagua –Portugal– el establecimiento de la planta dio lugar al desarrollo de un tejido empresarial de abastecimiento que no se habría desarrollado en ausencia de esta demanda). Tiene el inconveniente de que el nivel de inversión requerido es elevado, lo que hace que estas iniciativas se dificulten si dependen de Consejerías presupuestariamente limitadas –Medio Ambiente– en una Administración descentralizada como la española.
- **Promoción de la iniciativa privada, a través de convocatorias públicas de proyectos que serán objeto de ayuda pública.** Esta es la alternativa finalmente adoptada de forma general en Portugal o en Francia, así como en la Comunidad Autónoma gallega. Tiene la ventaja de que la exigencia de un proyecto puede (y debe) ir acompañada de la de un plan de suministro que permita analizar la viabilidad del proyecto y prever conflictos por la materia prima con otras industrias ya asentadas (tableros, celulosa, etc.). No obstante, parece insuficiente para garantizar el despegue de los proyectos aprobados, porque las incertidumbres en la estabilidad garantizada del suministro y la actual crisis financiera lastran la capacidad de financiación de los proyectos por la vía del crédito bancario.
- En todo caso, cabría destacar la **necesidad de que la promoción se dirija a proyectos tan eficientes como sea posible**, condicionando la ayuda a que se tratase de centrales de cogeneración –termoeléctricas–, a una potencia mínima instalada (4 ó 5 MW parece un límite inferior adecuado en la mayoría de los casos) y a un uso intensivo (una producción en MWh mínima que garantice un uso casi continuado de la instalación). El actual R.D. 661/2007 considera alguna de esas variables, si bien prima las instalaciones de pequeña escala, menores de 2 MW.
- También es razonable la **promoción por la Administración de instalaciones piloto o experimentales, directamente o a través de la iniciativa privada o mediante fórmulas mixtas, con tecnologías más o menos experimentales que mejoran los rendimientos energéticos de la generación**, como podrían ser las basadas en la gasificación o en determinadas tecnologías de pirólisis.

12.6.1.3. Co-combustión

Los incentivos directos a la co-combustión pueden tener el riesgo de resultar en una demanda muy grande en comparación con las posibilidades de producción. Una central térmica grande, como la de As Pontes de García Rodríguez, necesitaría para sustituir un 5% de su potencia instalada consumiendo biomasa en vez de carbón, un suministro alternativo de entre 900.000 y un millón de toneladas verdes de astilla al año. **El riesgo de distorsión que estas demandas pueden producir en los mercados tradicionales recomendarían, en**

opinión de muchos, limitar los incentivos y dejar que sea el mercado de las emisiones el que, sin una intervención pública excesiva, regule la demanda por parte de sectores como el cementero o el consumidor de carbón en centrales térmicas.

12.6.2. - Incentivación a la oferta o producción de biomasa forestal para uso energético

Las incertidumbres relativas al suministro, especialmente en plantas de generación eléctrica o cogeneración, se agravan por la falta de tradición en el aprovechamiento masivo de la biomasa forestal. La tradición de uso de leñas está prácticamente desaparecida en el medio urbano dominante y, además, se basaba en unos medios manuales que no son viables en las actuales circunstancias socioeconómicas. Esto implica problemas por el lado de la oferta, desde la incertidumbre sobre los precios, la desconfianza sobre los posibles efectos desfavorables de la retirada de la biomasa, la falta de maquinaria adecuada y de conocimientos sobre su uso, la falta de agentes que traten la materia prima y la procesen para adecuarla a las necesidades de la demanda, etc.

Las medidas de apoyo a la oferta son las grandes ausentes, o casi, de las políticas de renovables, porque no son tan necesarias en otros casos como en el de la biomasa forestal, y por razones administrativas, relacionadas con que los organismos que gestionan las ayudas a la generación energética con renovables (Ministerios o Consejerías de Industria y Energía o análogos) están mucho más próximas a la demanda de biomasa (productores de energía) que a su oferta (propietarios forestales, empresas de aprovechamiento, industrias forestales), cuyas particularidades y mecanismos les son ajenos.

Hay que señalar que estas medidas serán de utilidad siempre y cuando exista una demanda, aunque sea débil, dado que nadie va a aceptar ayudas para producir biomasa en un grado apreciable si nadie la va a consumir y, por ello, pagar.

Algunas de las medidas que se han ensayado, acompañadas de alguna observación sobre su eficacia, se comentan a continuación:

- **Ayudas a la adquisición de maquinaria** específica para el aprovechamiento de biomasa: son procedimientos útiles para fomentar la modernización de un tejido empresarial atomizado y con escasa capacidad de inversión. Debería acompañarse con medidas de formación y extensión (cursos, ferias sectoriales, viajes de intercambio con países o empresas cercanas, encuentros empresariales, etc.).
- **Promocionar el establecimiento de centros logísticos**, que puedan recepcionar y procesar la biomasa en diversas formas, facilitando la conexión entre la oferta y la demanda.
- **Trabajos de investigación sobre la adaptación de maquinaria y métodos de trabajo foráneos a las realidades de los espacios forestales españoles y difusión amplia de los resultados**. Las iniciativas emprendidas por Galicia, Andalucía, Castilla – La Mancha, Castilla y León, etc., con participación de la Administración central, han resultado útiles, aunque con cierta dispersión de esfuerzos y resultados hasta el momento.
- **Ayudas directas a la producción, en que se financia a la propiedad o a las empresas habilitadas por la propiedad por la ejecución de los tratamientos que dan lugar a biomasa forestal con uso energético**. Esta sería una iniciativa que consigui-

ría objetivos paralelos a los energéticos, como los citados de desarrollo rural, prevención de incendios, fomento de la gestión forestal sostenible, etc. Tiene el inconveniente de la dificultad de instrumentación por las Administraciones competentes, y de la dificultad de control. No obstante, hay iniciativas muy interesantes, como por ejemplo la de la Comunidad Valenciana (Orden de 12 de agosto de 2008, de la Conselleria de Medio Ambiente) que subvenciona a los propietarios por peso de biomasa retirada –para así fomentar que se movilice la biomasa en verde, evitando riesgos de incendios o plagas– condicionando la ayuda a la existencia de un anteproyecto firmado por un técnico competente en donde se asegura que la biomasa procede de un tratamiento selvícola, se especifican sus características y se cuantifica la disponibilidad de biomasa residual como consecuencia del mismo. También la Comunidad de Cantabria ha producido una iniciativa similar (Orden DES/64/2007, de 28 de diciembre), aunque sólo financia el empacado.

12.6.3. Incentivos de carácter transversal

- **Fomento de la investigación, desarrollo e innovación**, especialmente la relativa a la mecanización y su optimización, la logística y trazabilidad en las fases del suministro, así como la eficacia de la generación energética.
- En el caso español, una diferencia importante con los países próximos es la naturaleza totalmente descentralizada de la gestión forestal y la naturaleza parcialmente descentralizada de la gestión energética, lo que dificulta la aplicación de políticas nacionales. Esto hace que sea del máximo interés no sólo impulsar las mesas comunes que sirven como foros de reunión de las Administraciones central y autonómicas, sino también crear **órganos técnicos para la transmisión de información, como podría ser un Observatorio de la Biomasa Forestal**. Este órgano permitiría intercambiar información sobre las iniciativas, proyectos y medidas en las diferentes CC.AA., sobre estadísticas relativas al uso de los biocombustibles forestales y sobre los resultados de los proyectos de I+D+i, formación o difusión, ejecutados en los distintos ámbitos territoriales.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- ADEME, 2008: Programme national Bois-Energie 2000-2006 (National Woodfuel Programme 2000-2006): Rapport d'activités 2000-2006
- ALA-FOSSI, A., 2005 (FFRI) : *Forest Fuel production in Finland*. 5Eures Project Meeting. Joensuu.
- ALAKANGAS, E., T. SAURANEN y T. VESISENAHO, 1999: *Production technique of logging residue chips in Finland*. VTT Energy.
- ALAKANGAS, E., 2005: *Properties of wood fuels used in Finland*. BIOSOUTH Project. Project Report PRO02-2030-05. Disponible en Internet en: www.bio-south.com/pdf/BIO-SOUTH_Wood_fuel_properties_Oct2005_rev2.pdf -
- ALLUÉ, E., J. NADAL, A. ESTRADA y P. GARCÍA-ARGÜELLES, 2007: *Los datos antracológicos de la Balma del Gai (Bages, Barcelona): Una aportación al conocimiento de la vegetación y la explotación de los recursos forestales durante el tardiglaciar en el NE peninsular* Trabajos de Prehistoria 64, Nº 1, Enero-Junio 2007, pp. 87-97, ISSN: 0082-5638
- ALLUÉ ANDRADE, J.L., 1990: *Atlas fitoclimático de España*. INIA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- AMBROSIO, Y. y E. TOLOSANA, 2007: *Estudios de tiempos y rendimientos en los trabajos forestales. El programa Kronos*. Revista Montes nº87.
- 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 (inédita). E.T.S.I. Montes, U.P. Madrid.
- ASIKAINEN, A., 2004: *Integration of work tasks and supply chains in wood harvesting- cost savings or complex solutions?*. Rev. International Journal of Forest Engineering. Vol. 15, nº2. March 2004
- ASIKAINEN, A., T. RANTA, J. LAITILA y J. HÄMÄLÄINEN, 2001: *Costs and big scale production of forest residue chips*. Joensuu University. 107 pag. In Finnish.
- ASIKAINEN, A., R. BJÖHERDEN y I. NOUSIAINEN, 2002: *Cost of Wood Energy*. In Richardson *et al* (eds.), 2002: *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and practice*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. Pág. 125-157.
- BALBOA, M., J.G. ÁLVAREZ, R. RODRÍGUEZ-SOALLEIRO y A. MERINO, 2003: *Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. Parte II: Cuantificación e implicaciones ambientales*. Rev CIS-Madera, Nº10. Pág. 27-37.

- BALBOA, M., J. G. ÁLVAREZ y A. MERINO, 2005: *El aprovechamiento de la biomasa forestal y su impacto sobre la conservación de los suelos*. Presentación en el Seminario “Aprovechamiento de Biomasa Forestal con fines energéticos” (E.T.S.I. Montes, Madrid, diciembre de 2005)
- BALGAÑÓN, M., 2000: *Sistemas selvícolas*. Apuntes de silvicultura de la E.T.S.I. de Montes. Departamento de Silvopascicultura.
- BERTHELOT, A., J. RANGER y D. GELHAYE, 2000: *Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France*. *Forest Ecology and Management* 128 (3): 167-179.
- BJOHERDEN, R., 2009: *Harvesting Logging Residues: An Overview*. En libro de actas del congreso *Slash Congress*. Elmia Wood 2009. Jönköping, junio de 2009.
- BJOHERDEN, R. y M.A. THOMPSON, 1995: *Basic time concepts for international comparisons of time study reports*. *Proceedings del Congreso Mundial de IUFRO de 1995 en Montreal (Canadá)*. Pág. 124-143.
- CACOT, E., F. CHARNET, J. RANGER y S. VIEBAN, 2004: *Impact du prélèvement des rémanents en forêt*. *Information Forêt AFOCEL*. N°1 – 2004. Fiche N° 686. 6 pág.
- CACOT, E., N. EISNER, F. CHARNET, P. LEON, C. RANTIER y J. RANGER, 2006: *La récolte raisonnée des rémanents en forêt*. *Bioresources ADEME* (disponible en www.ademe.fr). 36 pág.
- CALLEJA SÁNCHEZ, R., C. DEL PESO y F. GONZÁLEZ HERRERO, 2007: *Alternativas de Futuro para la plantación de choperas en la provincia de Palencia*. Informe técnico. ITA-GRA para la Diputación de Palencia. 105 pág.
- CARBONELL E., 2007: *Sierra de Atapuerca: Pensar en la evolución* En: *Anales de la Real Academia de Medicina*. Año 2007, Tomo CXXIV, Cuaderno Primero. Real Academia Nacional de Medicina. pp 43-58
- CASE, 2004: *Excavadora de cadenas serie CX*. Catálogo de la marca.
- CATERPILLAR, 2007: *962H wheel loader*. Catálogo de la marca.
- CBE, 2004: *Acompanhamento de sistema de recolta, compressao e embalamento de residuos florestais*. Informe interno, 48 pág. (inérito).
- CENER, 2005: *Proyecto BIOSOUTH: Evaluación de biomasa forestal potencial y pruebas de aprovechamiento en Navarra*. Ponencia del Seminario: “El aprovechamiento de biomasa forestal para su uso energético”. E.T.S.I. Montes (Madrid), diciembre de 2005.
- CRUZ CALLEJA, A., 2005: *Dinámica de nutrientes en parcelas experimentales de Populus x euroamericana (Dode) Guinier “I-214*”. Tesis doctoral. E.T.S.I. de Agrónomos. Disponible en Internet en: <http://oa.upm.es>
- CUCHET, E., P. ROUX y R. SPINELLI, 2004: *Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France*. *Rev. Biomass and Bioenergy* 27 (2004) 31-39.
- CENER, 2005: *Evaluación de biomasa forestal potencial y pruebas de aprovechamiento en Navarra*. II Jornadas Proyecto BIO-SOUTH: Análisis tecno-económico de la producción y uso de los biocombustibles para aplicaciones de calor y frío en el Sur de Europa. Pamplona.
- CGC BIOMASA, 2005: *Mercado de la Biomasa: Gestión y Logística*. Seminario “El aprovechamiento de biomasa forestal para uso energético”. E.T.S.I. Montes, Universidad Politécnica de Madrid, diciembre de 2005.
- COMISION NACIONAL DEL CHOPO (MAPA), 2007: Documento interno proporcionado por Alonso, N.

Bibliografía

- COX, S.K. y D. H. VAN LEAR, 1985: *Biomass and nutrient accretion on piedmont sites following clearcutting and natural regeneration of loblolly pine*. Proc. Third Biennial South. Silv. Res. Conf. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. SO-54. E. Shoulders (ed.) Pág. 501-506.
- DGEG, 2007. *Renováveis estatísticas rápidas*. Lisboa.
- DGGE, 2005-2009: Estadísticas sobre energía en Portugal, disponibles en www.dgge.pt
- DOOSAN INFRACORE, 2006. *DX 340* . Catálogo de la marca.
- DOPPSTADT, 2006: Catálogos de trituradoras, pretrituradoras y cribas.
- DÖRY, L., 2007: *Opportunities and Threats of biomass: Experience of the Panel Industry*. Seminario organizado por ANFTA. Ministerio de Medio Ambiente (Madrid), junio de 2007.
- EMILSSON, S., 2006: *From Extraction of Forest Fuels to Ash Recycling. International Handbook*. 42 pág. Disponible en Internet (en www.recash.info).
- ERIKSSON, L. N. y L. GUSTAVSSON, 2007: *Biofuels from stumps and small roundwood—Costs and CO2 benefits* (en línea). rev. Biomass & Bioenergy. (disponible en www.sciencedirect.com). 6 pág.
- FAO, 1992: *Cost Control in forest harvesting and road construction*. FAO Forestry Paper n° 99. 106 pág. Roma (Italia).
- FEGONAT, S.L., 2007: *Proyecto de Construcción de Pista Forestal en el Monte Camporredondo*. Documento técnico.
- FERNÁNDEZ MANSO, A. y G. HERNANZ ARROYO (Coordinadores), 2004: *Populus (sp) Manual de gestión forestal sostenible*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Castilla y León.
- FERNANDEZ MOLOWNY, A., 1997: *Los chopos en la Cuenca del río Duero. Populicultura e inventario de las plantaciones administradas por la Confederación Hidrográfica del Duero*. Servicio del Medio Natural. Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Medio Ambiente.
- FERNANDEZ MOLOWNY, A., 1998: *Guía para determinar el precio de la madera de chopo en pie. Estimación de existencias y análisis económico sobre la rentabilidad de las chopearas*. Servicio del Medio Natural. Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Medio Ambiente.
- FIGO, S. (C.B.E.), 2005: Comunicación personal de esta investigadora del centro de biomasa cercano a Coimbra.
- FIGO, S., 2006: Country report of Portugal. EUBIONET II. WP1: Current situation and future trends in biomass fuel trade in Europe.
- FIGO, S. (C.B.E.), 2006: *Current situation and future trends in biomassfuel- Country report from Portugal*. EUBIONET Project.
- FRAYSSE (AFOCEL, 2005): Valorisation énergétique de gisements inexploités de biomasse en Finlande. Fiche Information – Forêt AFOCEL
- FRAYSSE, J., 2007. *Récolte des branches et des souches en vue d'une valorisation énergétique*. Informations-Forêt AFOCEL. N°3-2007 Ficha n° 756. 6 p.
- GALMEN, 2007. *Pulpo PBP*. Catálogo de productos.
- GAROZ, L., 2009: *Estudio del aprovechamiento de biomasa forestal en una masa de Populus x eurioamericana en el T.M. de Santa Cristina de la Polvorosa (Zamora)*. Trabajo Fin de Carrera de la E.U.I.T. Forestal, universidad Politécnica de Madrid (inédito)
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ DE LINARES, V. M., 1987: *“Estudio del modelo finlandés de Aprovechamientos del Montes con Fines Energéticos”* .Trabajo de Fin de Carrera de la

- UIT Forestal, Universidad Politécnica de Madrid (Inédito).
- GOREN-INBAR, N., N. ALPERSON, M. E. KISLEV, O. SIMCHONI, Y. MELAMED, A. BEN-NUN, E. WERKER, 2004: *Evidence of Hominin Control of Fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel Science* 30 April 2004: Vol. 304. no. 5671, pág. 725 - 727
- HAKKILA, P., 1989: *Utilization of Residual Forest Biomass*. Springer. (Series in Wood Science). 568 pág.
- HAKKILA, P., 1998: *Possibility of forest residue as an energy source*. Puuenergia 3/1998. Pág. 8-9. In Finnish.
- HAKKILA, P., 2003 (VTT Processes): *Developing technology for large-scale production of forest chips*. Wood Energy Technology Programme 1999-2003. Technology Programme Report 5/2003. Interim Report. TEKES, 54 pág.
- HAKKILA, P. y M. ARNIAALA, 2004a: *Young stands as a source of energy*. Wood Energy Technology Programme. Newsletter on results 3/2004. TEKES.
- HAKKILA, P. y M. ARNIAALA, 2004b: *Increased use of forest fuel to expand the raw material base Stump- An unutilized reserve*. Wood Energy Technology Programme. Newsletter on results 4/2004. TEKES.
- HAKKILA, P. y T. FREDRIKSSON, 1996: *Metsämme bioenergian lähteenä*. [Our forests as bioenergy source]. Finnish Forest Research Institute. Research Papers 613. 92 pp.
- HAKKILA, P., y H. KAJALA, 1983: *Puu- ja kuorituhan palauttamisen tekniikka*. Summary: The technique of recycling wood and bark ash. Folia Forestalia 552: pp. 1-37.
- HAKKILA, P., 2004: *Developing technology for large-scale production of forest chips* Wood Energy Technology Programme. 1999-2003. TEKES Project
- HÄMÄLÄINEN, J., R. LILLEBERG, A. POIKILA y K. RIEPPO, 1998: *Harvesting energy wood in connection with young stand treatment*. Jyväskylä. Science park. Project Book 1993-1998. Part I, Production of Wood Fuels. Pag. 179-186. In Finnish, English abstract...
- HAMMEL, 2007. *Trituradora Diesel / Eléctrica Tipo 450/650/750/850/950*. Catálogo de la marca.
- IDAE, 2007: *Energía de la biomasa* Manuales de energías renovables
- IHONEN, M., 1997: *NaarvaSyke single grip cutting device in cutting of pulpwood and fuelwood*. Work efficiency Institute. Forest Bulletin 11 (579). In Finnish, summary in English.
- IHONEN, M., 1998: *AM 240 single grip cutting device in cutting of pulpwood and fuelwood*. Work efficiency Institute. Forest Bulletin 4 (587). In Finnish, summary in English.
- JIMÉNEZ, N., M. R. IZQUIERDO y J. IMORALES MESA, 2008: *Producción de biocombustible sólido a partir de tocones de eucalipto (Eucalyptus globulus) procedentes de restauración de zonas incendiadas*. Boletín del CIDEU 5: 21-29.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN, 2005: *Castilla y León crece con el bosque*. Serie Divulgativa de la Consejería de Medio Ambiente.
- JYLHÄ, P. y J. LAITILA, 2007: *Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler*. Silva Fennica 41(4): 763-77
- JONES H.E., M. MADEIRA, L. HERRAEZ, J. DIGHTON, A. FABIÃO, F. GONZÁLEZ-RIO, M. FERNANDEZ MARCOS, C. GOMEZ, M. TOMÉ, H. FEITH, M. C. MAGALHÃES y G. HOWSON, 1999: *The effect of organic-matter management on the productivity of Eucalyptus globulus in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment*. Forest Ecology and Management 122, 73-86

Bibliografía

- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN, 2005: *Castilla y León crece con el bosque*. Folleto divulgativo. Serie divulgativa de la Consejería de Medio Ambiente.
- KÄRHÄ, K., 2007: *Machinery for forest chip production in Finland in 2007*. Metsäteho OY Research Results.
- KALLIO, M. y A. LEINONEN, 2005: *Production Technology of Forest Chips in Finland*. Project Report PRO2/P2032/05. VTT Processes.103 pág.
- KALLIOLA T. Y M. MARKKILA, 2004: *Increased use of forest fuels to expand the raw material base. Stumps – an unutilised reserve*. TEKES. Wood Energy Technology Programme. Newsletter on results 4/2004. (disponible en www.tekes.fi)
- KORPILAHTI, A., 2001: *Forest residues harvesting chains based on chipping at the end use*. Espoo. Technical Research Centre of Finland. In E. Alakangas (Ed.) Yearbook 2001 of Wood Energy Technology Programme. VTT Simposium 216. Pag. 137-152 (In Finnish).
- KUITTO, P.-J., S. KESKINEN, J. LINDROOS, T. OIJALA, J. RAJAMÄKI, T. RÄSÄNEN, y J. TERÄVÄ, 1994: *Mechanized cutting and forest haulage*. Metsäteho, Report 410. 38 pag.
- KUKKOLA, M. y E. MÄLKÖNEN, 1997: *The role of logging residues in site productivity after first thinning of Scot spine and Norway spruce stands*. In: Hakkila, P., Heino, M. & Puranen, E. (eds.). Forest Management for Bioenergy. IEA Bioenergy, Proceedings of a joint meeting of Activities 1.1, 1.2 and 4.2 of Task XII in Jyväskylä, Finland, September 9 and 10, 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 640: 230-237.
- LAGOA, B., 2005. Comunicación personal del responsable de “Logística Florestal” en el área de Estoril (Portugal).
- LAILILA, J. 2005 (FFRI): *Cost Structure of Supply Chains in Finland*. Northern Woodheat Symposium. Joensuu, Finland.
- LAILILA, J., ASIKAINEN, A., y NUUTINEN, Y., 2007: *Forwarding of Whole Trees After Manual and Mechanized Felling Bunching in Pre-Commercial Thinnings*. Rev. International Journal of forest Engineering, Vol. 18, N°2, pág. 29-39
- LAILILA J, O.-J.KORPINEN, T. RANTA, E. JÄPPINEN y E. HÄMÄLÄINEN, 2006: *Forest fuel supply chains based on terminals and stumps*. Lappeenranta University of Technology, P.O. Box 181, 50101 Mikkeli, Finland
- LÓPEZ SENESPLADA, E., 2003: *Modelos de Tiempos y Rendimientos de dos sistemas de aprovechamiento para las cortas de chopo en Castilla y León*. Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Inédito.
- MACICIOR, I., 2007: *Los tocones como biocombustible; manejo y transformación*”. Presentación en el Congreso Internacional de Bioenergía. Valladolid, 24 de Octubre de 2007.
- MANITOU, 2007: *MANISCOPIC MT 940 LT*. Ficha técnica.
- MANN L.K., D. W. JOHNSON, D. C. WEST, D. W. COLE, J. W. HORNBECK, C. W. MARTIN, H. RIEKERK, C. T. SMITH, W. T. SWANK, L. M. TRITTON y D. H. VAN LEAR., 1988: *Effects of whole tree and stem-only clearcutting on postharvest hydrologic losses, nutrient capital, and regrowth*. Forest Science 34, 412-428.
- MARCOS MARTÍN, F., 2001: *Biocombustibles sólidos de origen forestal*. AENOR.
- MIELLIKÄINEN, K. y P. HAKKILA, 1998: *Review of wood fuel from pre-commercial thinnings and plantation cleaning in Finland*. In “Wood fuel from early thinning and plantation cleaning. An international review. Helsinki. Finish Forest Research Institute (FFRI). Research Paper 667.

- MIYATA, E.S. 1981. “*Logging system cost análisis. Comparision of methods used operating costs of logging equipment*”. U.S.D.A. Forest Service, General Technical Report NC-55. U.S.D.A. Forest Service. North Central Forest Experimentation Station, St. Paul, Minnesota.
- MONTERO G., R. RUIZ-PEINADO y M. MUÑOZ, 2005: *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. Monografías INIA, nº 13. 270 pág.
- MONTOYA OLIVER, J.M. 1988. “*Chopos y choperas*”. Mudi-Prensa.
- NAVARRO, C., 2005 (ANFTA): *Experiencias de aprovechamiento de la biomasa forestal por la industria del tablero*. Ponencia presentada en el Seminario El Aprovechamiento de Biomasa Forestal para Uso Energético. E.T.S.I. Montes (Madrid), 1-2 de diciembre de 2005.
- NISBET, R. M., S. DIEHL, W. G. WILSON, S. D. COOPER, D.D. DONALSON, K. KRATZ, 1997: *Primary productivity gradients and short-term population dynamics in open systems*. *Ecol. Monogr.*, 67, 535-553
- OPET & VTT, 2001- Referenciado en esta lista como Ranta, T., P. Halonen y E. Alakangas, 2001: *Production of forest chips in Finland*. OPET Report 6. OPET Finland & VTT. 58 pág.
- PARÉ, D. et al., 1999: *Predicting the effect of forest harvesting on soil nutrient availability in the boreal forest*. Project Report 33-1999. Sustainable forest management network.
- PADRO A. y J.V. ORENSANZ, 1987. *El chopo y su cultivo*. MAPA, Serie Técnica, nº 13. 446 pág.
- PATRAO, G., 2007 (EDP - Produção - Bioelétrica, S. A.): *Biomass Power Plants in Portugal*. Comunicación presentada en el Seminario Seminario “La Biomasa forestal como fuente de energía y desarrollo rural”. UIMP, Cuenca. Julio de 2007.
- PEDERSEN, L.B. y J. BILLE-HANSEN, 1999: *A comparison of litterfall and element fluxes in even aged Norway spruce in Denmark*. *Forest Ecology and Management* 114;55-70
- POISSONET, M. (FCBA-AFOCEL), 2008: *French Forest Biomass Sector (a brief highlight)*. Comunicación personal.
- PROE M.F. Y J. DUTCH, 1994: *Impact of whole-tree harvesting on second-rotation growth of Sitka spruce: the first 10 years*. *Forest Ecology and Management* 66, 39-54.
- PROFOR, 2006. *Monte: señal de vida en Castilla y León*. Serie divulgativa de la Consejería de Medio Ambiente.
- RANTA, T. y S. RINNE, 2006: *The profitablility of transporting uncomminuted raw materials in Finland*. *Biomass and Bioenergy* 30(3), 231-237.
- RANTA, T., P. HALONEN y E. ALAKANGAS, 2001: *Production of forest chips in Finland*. OPET Report 6. OPET Finland & VTT. 58 pág.
- REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICA Y NATURALES, 1996: *Vocabulario científico y técnico*. Espasa Calpe. Madrid.
- RENEW – *Renewable fuels for advanced powertrains. Integrated Project Sustainable energy systems 2003 Review on existing studies and definitions of biomass provision chains*. Deliverable D 3. 5. 5.
- DEL RÍO, M., E. LÓPEZ SENESPLEDA y G. MONTERO, 2006: *Manual de Gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L., y Pinus nigra Arn. en Castilla y León*. Junta de Castilla y León. 76 pág.
- RODRIGUEZ ABELLA, D., 2007: Comunicación personal del responsable industrial del grupo de Tablero TAFISA.

Bibliografía

- RODRÍGUEZ BACHILLER, A., 2005: *Experiencias de ENCE en el aprovechamiento de la biomasa forestal*. Ponencia presentada en el Seminario El Aprovechamiento de Biomasa Forestal para Uso Energético. E.T.S.I. Montes (Madrid), 1-2 de diciembre de 2005.
- ROIG, S., M. DEL RÍO, R. RUIZ-PEINADO e I. CAÑELLAS, 2007: *Tipología dasométrica de los rebollares (Quercus pyrenaica Willd.) de la zona centro de la península Ibérica*. Actas de la XLVI Reunión Científica de la SEEP, pp: 535-542.
- RÖSER, D. y L. SIKANEN, 2006 (FFRI): *The Structure of Forest Fuel Supply Chain*. Northern Woodheat. Woodfuel Training Course, METLA.
- SANZ, F. y G. PIÑEIRO, 2002: *Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. Parte I: Situación actual y evaluación de sistemas de tratamiento*. Rev CIS-Madera, nº 10. Pág 6-26.
- SAVOLAINEN, V. y R. BERGGREN (editores), 2000: *Wood Fuels Basic Information Pack*. Jyväskylä
- SIERRA VIGIL, M., 2008: *Sobre el lenguaje forestal: los mal llamados biocombustibles*. Rev. PROFOR-?S, Nº1, Primer semestre de 2008. Pág. 51.
- SIKANEN L., D. ROSER y A. ASIKAINEN, 2005: *Machinery and systems in different scales of forest fuel supply chains*. METLA. Presentación en el congreso *Biomass production energy from forestry and agriculture*. Elgin, Scotland, 21-22 de Noviembre de 2005.
- SIKANEN, L. y T. TAHVANAINEN (FFRI), 2006: *Estimation of Forest Fuel Potential*.
- SOUSA, C. (Centro da Biomassa para a Energia), 2008: BIOMASSA FLORESTAL as FER e a situação energética do país. Comunicación personal.
- SPINELLI, R. y B. HARTSOUGH, 2001: *Indagini sulla cippatura in Italia (A survey of Italian chipping operations)*. Contributi scientifico-practici per una migliore conoscenza ed utilizzazione del legno. Vol XLI. CNR
- SPINELLI, R., NATI, C. y MAGAGNOTTI, N. 2005 : *Harvesting and transport of root biomass from fast-growing poplar plantations*. rev. Silva Fennica 39(4): pp. 539–548.
- SPINELLI, R. – CNR/IVALSA -, 2007: Chapter 1: “Biomass, LAGs and the transnational project” y Chapter 6: “Conclusions”. In Gaio, Da Val and Carrara (Coord.), 2007. “Guidelines for the development of a forest chips supply chain model”
- SPINELLI, R., 2008: Comunicación personal.
- SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CIENCIAS FORESTALES, 2005: *Diccionario forestal*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid
- SYDVED, 2005: *Comunicaciones personales de los técnicos de la filial lignoenergética de Störa-Enso en el área de Gotemburgo*.
- TIMBERJACK. *Guide FMG Timberjack at Elmia WOOD 93*. Catálogo de la marca.
- TEKES, 2003: *R&D on the wood fuel production chains*. Wood Energy Technology Programme
- TOLOSANA E., 1999: “*El aprovechamiento forestal mecanizado en las cortas de mejora de Pinus sylvestris L. Modelos de tiempos, rendimientos y costes y estudio de sus efectos ambientales*” Tesis Doctoral E.T.S.I. Montes (Madrid). Disponible en Internet.
- TOLOSANA, E., Y. AMBROSIO Y S. VIGNOTE, 2002: *Rendimientos, costes y efectos ambientales de las claras mecanizadas sobre repoblaciones de Pinus sylvestris L. en España*. Rev. Sistemas y Recursos Forestales, Vol 11(1). INIA. Madrid.
- TOLOSANA E., V. M. GONZÁLEZ y S. VIGNOTE, 2004: *El aprovechamiento maderero*. Editorial Mundi Prensa & FUCOVASA. 675 pág.

- TOLOSANA, E., Y. AMBROSIO, R. LAINA. M. MARTÍN y R. MARTÍNEZ-FERRARI, 2006 a 2008: *Informes preliminares sobre las experiencias de aprovechamiento de biomasa forestal* Realizadas a iniciativa de la Junta de Castilla y León y CESEFOR en León y Soria (inéditos).
- TOLOSANA, E., Y. AMBROSIO, R. LAINA. M. MARTÍN y R. MARTÍNEZ-FERRARI, 2008a: *Guía de la maquinaria para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal*. Ed. Junta de Castilla y León y Fundación CESEFOR. 89 pág. Disponible en www.cesefor.es.
- TOLOSANA, E., R. MARTÍNEZ-FERRARI, R. LAINA., Y. AMBROSIO, L. GAROZ, J. GUINEA, L. GONZÁLEZ y T. GARCÍA, 2008b: *Manual de buenas prácticas para el aprovechamiento integrado de biomasa en choperas*. Ed. Junta de Castilla y León y Fundación CESEFOR. 83 pág. Disponible en www.cesefor.es
- TOLOSANA, E. y R. LAÍNA, 2009: *Manual de Buenas Prácticas en la ejecución de Tratamientos Selvicolas en Murcia*. Ed. Consejería de Agricultura y Agua. Dirección General de Patrimonio Natural y Biodiversidad. C.A. de la Región de Murcia. ISBN 978-84-691-6864-6. 73 pág.
- TOLOSANA, E. y R. LAÍNA, 2009: *Manual de Buenas Prácticas para Aprovechamientos Forestales*. Ed. Consejería de Agricultura y Agua. Dirección General de Patrimonio Natural y Biodiversidad. C.A. de la Región de Murcia. ISBN 978-84-691-6864-6. 55 pág.
- TRAGSATEC - UPM, 1999: *Evaluación de los residuos forestales y agrícolas potenciales en España*. Plan de fomento de la utilización de los residuos forestales y agrícolas con fines energéticos (IDAE).
- TRAGSA (2001): *Tarifas de costes de los trabajos forestales 2000*. Documento interno (inédito).
- UNIÓN EUROPEA, 2008: Italy: Renewable Energy Fact Sheet
- VÄÄTÄINEN, K., 2007 (FFRI): *Wood fuel procurement methods and logistics in Finland*. METLA Symposium in Eberswalde. June 2007.
- WORRELL, R; A. HAMPSON. 1997. *The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soil. A review*. Forestry Vol 70 N 1
- WRI, 2005: World Resources Institute (2005). *EarthTrends: The Environmental Information Portal*. Available at <<http://earthtrends.wri.org>>.
- 5EURES Project Training Sessions. June 2006, Joensuu, Finland (disponible en Internet, en [http://www.ncp.fi/koulutusohjelmat/metsa/5Eures/2Training/Estimation of potential.ppt](http://www.ncp.fi/koulutusohjelmat/metsa/5Eures/2Training/Estimation%20of%20potential.ppt))