

Energía de la
Biomasa

Biomasa

Experiencias
con biomasa
agrícola y
forestal para
uso energético



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

Energía de la
Biomasa

Biomasa

Experiencias con biomasa agrícola y forestal para uso energético

TÍTULO

“Biomasa: Experiencias con biomasa agrícola y forestal para uso energético”

DIRECCIÓN TÉCNICA

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)

ELABORACIÓN TÉCNICA

ESCAN, S.A.

.....
Esta publicación ha sido producida por el IDAE y está incluida en su fondo editorial.

Cualquier reproducción, parcial o total, de la presente publicación debe contar con la aprobación por escrito del IDAE.

Depósito Legal: M-27147-2008

ISBN: 978-84-96680-32-6
.....

IDAE

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía


c/ Madera, 8

E – 28004 – Madrid

comunicacion@idae.es

www.idae.es

Madrid, mayo 2008



Introducción	5 -
1 Nuevas masas forestales y cultivos herbáceos	7 -
1.1 Experiencias de nuevas masas forestales	8 -
1.2 Experiencias del cultivo leñoso de chopo en Italia.	19 -
1.3 Experiencias de cultivos herbáceos.	21 -
2 Biomásas forestales	25 -
2.1 Experiencias sobre aprovechamiento de biomásas forestales. .	29 -
2.2 Dispersión de costes	39 -
3 Biomásas agrícolas	41 -
3.1 Generación y aprovechamiento de biomásas agrícolas	41 -
3.2 Experiencias sobre aprovechamiento de residuos agrícolas. . .	43 -
4 Panorámica general.	47 -
5 Glosario de términos.	49 -
6 Bibliografía y referencias	53 -





INTRODUCCIÓN

Este documento tiene como principal objetivo hacer un breve recorrido por las experiencias recientes en España de la gestión y aprovechamiento de la biomasa sólida, tanto de masas forestales leñosas y cultivos herbáceos, como de restos de aprovechamientos forestales y agrícolas.

El contenido del documento hace referencia al aprovechamiento de la biomasa sólida hasta el momento de su puesta a disposición en fábrica o planta de aprovechamiento. También hace referencia a algunas características para su posterior utilización como combustible pero no a la tecnología para su utilización (calderas, maquinaria para fabricación de pellets o briquetas, etc.).

Aunque existe una abundante información, si bien dispersa, sobre experiencias en el campo del aprovechamiento de los restos de tratamientos selvícolas forestales, esta información es difícilmente comparable debido a que los escenarios son diferentes (tamaño de la explotación, métodos empleados, condiciones locales y climatológicas, cargas de biomasa por unidad de superficie, rendimientos de maquinaria, experiencia de los operarios y otras). En lo que se refiere a biomasa forestal, para la elaboración de este documento, se ha utilizado el trabajo de recopilación llevado a cabo para IDAE por la empresa Dendros GF, S.L.

En cuanto a los aprovechamientos de restos de cultivos agrícolas y aprovechamientos de cultivos con fines energéticos, aunque son campos muy amplios y existen cierto número de experiencias, una vez más, la información disponible es escasa, dispersa y poco comparable.



1 Nuevas masas forestales y cultivos herbáceos

Existen cultivos cuya producción está destinada exclusivamente a su aprovechamiento energético como biomasa, a diferencia de los cultivos tradicionales, enfocados fundamentalmente al uso en la alimentación humana y animal. El acondicionamiento de los cultivos con fines energéticos da lugar a productos de fácil utilización en los sistemas de transformación convencionales, permitiendo la sustitución de los combustibles tradicionales fósiles.

Con el objetivo de determinar la idoneidad del cultivo con fin energético para su aprovechamiento en una cierta área deben considerarse los siguientes factores, que son de importancia para la producción de energía.

- Balance energético por hectárea y utilización efectiva de todos los componentes del cultivo en el proceso.
- El poder calorífico.
- El contenido en cenizas de la planta cosechada, sus propiedades, punto de fusión y contenido de humedad.

El rendimiento del cultivo seco y el poder calorífico de los cultivos son factores relevantes para determinar el potencial como fuente de energía de los combustibles sólidos. Por lo tanto, es de destacar que el rendimiento de la materia seca depende fuertemente de las condiciones del suelo y del clima, mientras que el contenido de agua depende del periodo en que se realice la cosecha.

En la Tabla 1 se presentan resultados a nivel europeo recopilados por AEBIOM (Asociación Europea de Biomasa) que incluyen el rendimiento del cultivo seco, el contenido medio de energía y los contenidos en cenizas y agua para diversos cultivos con fines energéticos:

Cultivo	Rto. [t _{seco} / (ha año)]	Poder calorífico Inferior (PCI) [MJ/kg _{seco}]	Producción Energética/ha [GJ/ha]	Contenido de agua tras cosecha [%]	Contenido en cenizas [% en peso]
Paja	2-4	17,0	35-70	14,5	5,0
Sauce	8-15	18,5	150-280	53,0	2,0
Chopo	9-16	18,7	170-300	49,0	1,5
Miscanthus	8-32	17,5	140-560	15	3,7
Cáñamo	10-18	16,8	170-300	–	–
Giant reed	15-35	16,3	245-570	50	5
Reed canary grass	6-16	16,3	100-130	13	4
Panicum virgatum	9-18	17	–	15	6
Robinia pseudo acacia	5-10	19,5	100-200	35	–
Madera	3-5	18,7	74,8	50,0	1-1,5

Tabla 1: Características de cultivos energéticos¹. AEBIOM–European Biomass Statistics 2007.

1.1 EXPERIENCIAS DE NUEVAS MASAS FORESTALES

En España se están realizando experiencias con diferentes masas forestales leñosas: de regadío (*sauce y chopo*), de semirregadío (*Robinia pseudoacacia*) y de secano (*acacia, olmo de Siberia y eucaliptos*). Se ha experimentado en Soria² últimamente con paulonia en regadío, con resultados mejorables, y también se está experimentando en otras regiones de Cataluña y Extremadura con esta misma especie sin tener aún conclusiones.

Con respecto a los primeros, cultivos de regadío, son abundantes las experiencias en Europa y otras zonas de EE.UU. y Canadá. Sobre el cultivo del sauce existe una larga experiencia en los países nórdicos y, por tanto, la maquinaria especializada para su cosecha y procesado es una realidad ampliamente afianzada. La populicultura para producción energética en Italia está ampliamente desarrollada, siendo los principales proveedores de clones para el cultivo del chopo con fines energéticos³.

En España se han llevado a cabo algunas experiencias sobre el cultivo del chopo con fines energéticos y prácticamente ninguna del cultivo del sauce (excepto para la producción de mimbre en Cuenca, pero no con fines energéticos).

Con el cultivo del chopo se han realizado experimentaciones en Aranjuez (Madrid) a finales de los años 80 y experiencias en vivero en Salamanca, ambas para producción de chopo en monte bajo a altas densidades (por encima de los 20.000 pies/ha) y rotaciones a 2-3 años.

Recientemente, en el ámbito del Proyecto Singular Estratégico “On-Cultivos”⁴, apoyado desde el Ministerio de Educación y Ciencia, coordinado por CIEMAT, y con participación de socios de diferentes campos implicados (agricultores, suministradores de planta, proveedores de maquinaria y tecnología, empresas de producción energética, instituciones de investigación, consultorías y otros) se han puesto en marcha una serie de experiencias sobre el cultivo del chopo y se esperan resultados. El proyecto arrancó en 2005 y dura 8 años. Estas experiencias proponen el cultivo del chopo en densidades altas y rotaciones cortas.

A continuación se muestran una serie de experiencias de producción de especies leñosas en diferentes escenarios de la geografía española. Esta información ha sido recopilada por la empresa Dendros GF, S.L., al igual que la que se recoge en el apartado número 2.

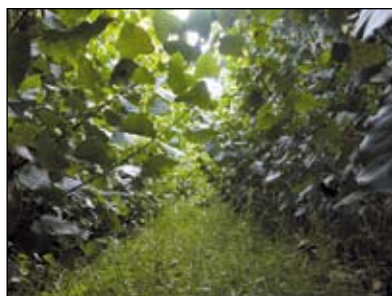


Figura 1: Plantación de chopo en Granada.
Fuente: ASAJA.

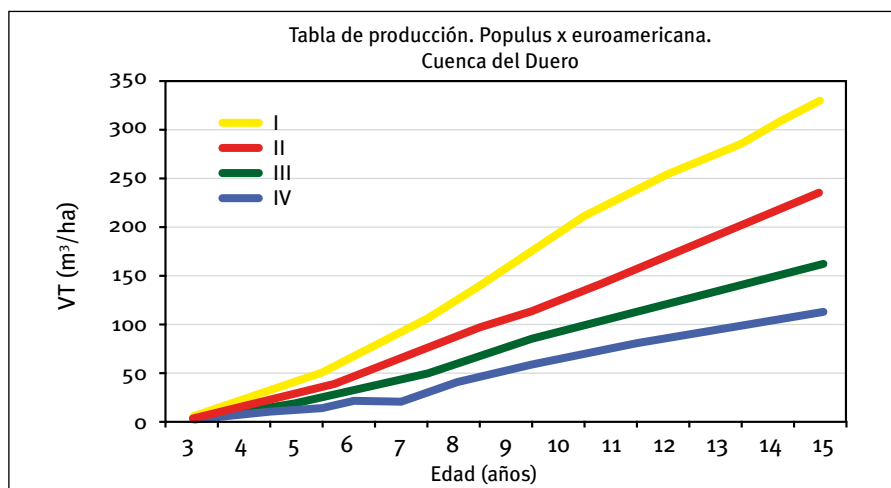
1.1.1 Producción de chopo en la Cuenca del Duero⁵

En este trabajo se deseaba conocer las producciones de chopo (*populus x euroamericana*) situado en la cuenca del Duero, en monte alto, en un marco de plantación 8x5, es decir, 250 pies/ha, sin uso de riego y cuyo destino final era madera en desarrollo.

Las tablas de producción para *Populus x euroamericana* disponibles en la citada cuenca son las siguientes. Establecidas 4 calidades o índices de sitio (SI), de acuerdo al área basimétrica que alcanza la chopera a los 10 años de edad, ofreciendo el dato del volumen total (VT, en m³/ha) y crecimiento medio (CM, en m³/ha y año):

Calidad SI (m ² /ha)	I		II		III		IV	
	20,21		16,77		13,31		9,87	
Edad	VT	CM	VT	CM	VT	CM	VT	CM
3	3,59	1,20	2,53	0,84	1,77	0,59	1,28	0,42
4	14,75	3,69	10,37	2,59	7,29	1,82	5,12	1,28
5	34,43	6,89	24,22	4,84	16,99	3,40	11,96	2,39
6	60,59	10,10	42,61	7,10	29,91	4,98	21,04	3,50
7	90,72	12,96	63,81	9,75	44,79	6,40	21,50	3,07
8	122,79	15,35	86,37	10,79	60,62	7,57	42,64	5,33
9	155,39	17,27	109,29	12,14	76,72	8,52	53,96	5,99
10	187,61	18,76	131,95	13,19	92,62	9,26	65,14	6,51
11	218,87	19,90	153,94	13,99	108,05	9,82	75,99	6,90
12	248,86	20,74	175,04	14,58	122,86	10,23	86,41	7,20
13	277,43	21,34	195,13	15,01	136,97	10,53	96,34	7,41
14	304,52	21,75	214,18	15,29	150,34	10,73	105,74	7,55
15	330,13	22,01	232,19	15,47	162,98	10,86	114,63	7,64

Tabla 2: Producción para Populus x euroamericana. Montes, Revista de ámbito forestal, número 44. Asociación y Colegio de Ingenieros de Montes. Madrid.



Gráfica 1: Tablas de producción Populus x euroamericana. Montes, Revista de ámbito forestal, número 44. Asociación y Colegio de Ingenieros de Montes. Madrid.

Se debe tener en cuenta que la anterior tabla de producción se refiere a plantaciones en marco de 8x5 (250 ud/ha) aplicables a las plantaciones de marco 6x6 (278 ud/ha) usuales en la zona.

Esta tabla arroja productividades, según calidades de sitio, de 12 a 35 m³/ha a los 5 años; lo que equivale a un crecimiento de entre 2,39 y 6,89 m³/ha y año.

1.1.2 Producción de eucalipto. Cultivo de secano en el suroeste⁶

La experiencia existente en España es la del cultivo del eucalipto para abastecimiento de fábricas de celulosa y pasta de papel (ENCE). Principalmente se dan en el suroeste y noroeste de España.

La reorientación del negocio hacia el mercado energético parece una realidad en la actualidad en el Grupo ENCE. Las limitaciones a este cultivo, aparte de las posibles reacciones sociales y las productividades marginales, son la existencia de posibles heladas extemporáneas, o precipitaciones insuficientes (menos de 500 mm).

El objetivo de este trabajo era estudiar las producciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) situado en el suroeste de España, en una plantación en monte alto y 2 recepes, con densidades de 600-800 pies/ha, cuyo destino final era trituración para pasta de papel.



Figura 2: Cultivo Eucalipto.

Para tener una idea de producciones a edades más tempranas que las que tradicionalmente se han venido utilizando para la producción de pasta papelera,

pueden servir las tablas de producción de esta especie para las dos zonas geográficas mencionadas.

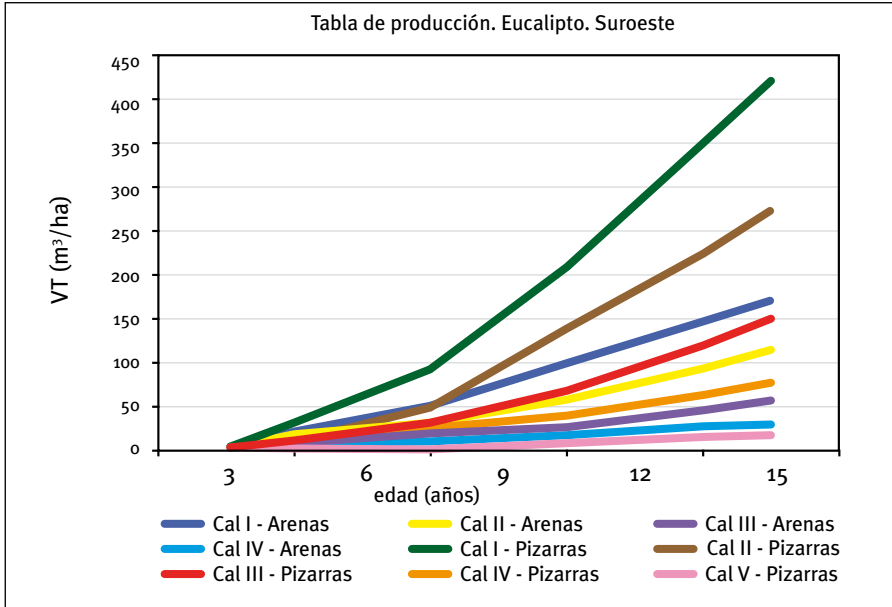
Suelo	Edad	Calidad I Ho=16 m (9 años)		Calidad II Ho=13 m (9 años)		Calidad III Ho=10 m (9 años)		Calidad IV Ho=7 m (9 años)	
		VT	CM	VT	CM	VT	CM	VT	CM
			3	4,0	1,33	1,5	0,50	0,7	0,23
	6	28,7	4,78	13,7	2,28	6,2	1,03	2,7	0,45
Arenas	9	73,8	8,20	39,5	4,39	18,6	2,07	7,3	0,81
	12	125,1	10,43	75,4	6,28	35,7	2,98	13,0	1,08
	15	176,3	11,75	115,7	7,71	57,2	3,81	18,9	1,26

Tabla 3: Área de producción suroeste. Suelo: arenas. Dirección General de la Producción Agraria, Ministerio de Agricultura. Madrid.

Suelo	Edad	Calidad I Ho=20 m (9 años)		Calidad II Ho=17 m (9 años)	
		VT	CM	VT	CM
			3	3,9	1,30
	6	45,7	7,62	24,5	4,08
Pizarras	9	145,6	16,18	85,6	9,51
	12	277,3	23,11	176,2	14,68
	15	417,8	27,85	278,5	18,57

Suelo	Edad	Calidad III Ho=20 m (9 años)		Calidad IV Ho=17 m (9 años)		Calidad V Ho=14 m (9 años)	
		VT	CM	VT	CM	VT	CM
			3	1,4	0,47	0,8	0,27
	6	13,3	2,20	22,8	0,97	2,7	0,45
Pizarras	9	45,0	5,00	21,0	2,33	7,9	0,88
	12	91,6	7,63	44,7	3,73	15,0	1,25
	15	147,3	9,82	73,7	4,91	23,0	1,53

Tabla 4: Área de producción suroeste. Suelo: pizarras. Dirección General de la Producción Agraria, Ministerio de Agricultura. Madrid.



Gráfica 2: Producción Eucalipto, suroeste. Dirección General de la Producción Agraria, Ministerio de Agricultura. Madrid.

A turnos del orden de 6 años para el suroeste, de acuerdo con estas tablas de producción, se podría alcanzar del orden de 4,8 m³/ha y año (3,5 t/ha y año) sobre suelos de arenas en las mejores calidades, y sobre pizarras del orden de 7,6 m³/ha y año (5,6 t/ha y año), calidades a las que habría que ir, ya que las productividades en calidades menores son muy bajas y poco atractivas.

1.1.3 Producción de eucalipto. Cultivo de secano en el Norte⁷

Para conocer las producciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) situado en el Norte de España en una plantación en monte alto y 2 recepes, con densidades de 2.600-2.400 pies/ha, y cuyo destino final era trituración para pasta de papel, y en general, para el cultivo del eucalipto en el norte de España son varias las tablas de producción publicadas. Son especialmente interesantes para la producción de biomasa las elaboradas por Fernández López (1982), puesto que aportan las productividades para densidades elevadas, más próximas a las usuales en plantaciones para producción energética, y tanto en el primer corte (brinzales, procedentes de reproducción por semilla) como en los sucesivos (chirpiales, procedentes de reproducción vegetativa que les permiten crecer

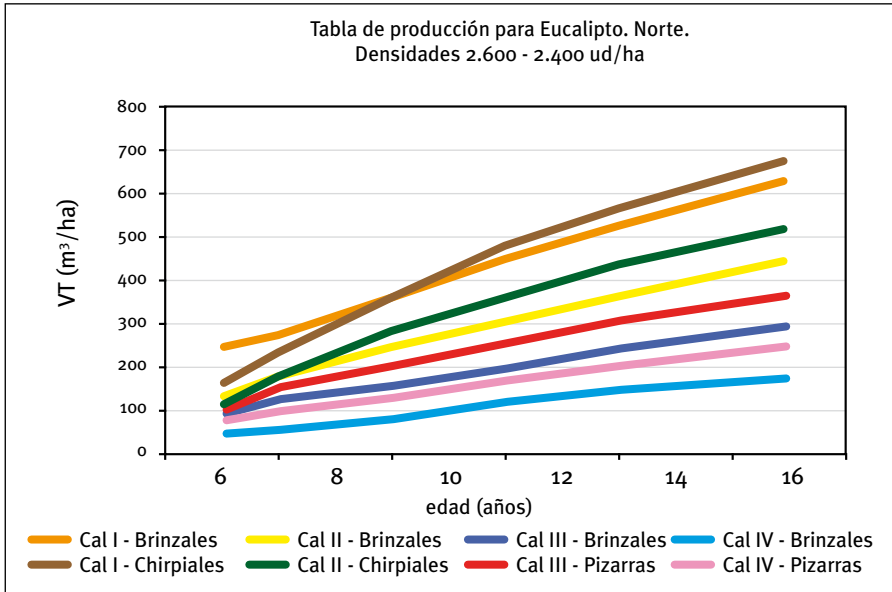
rápidamente), aportando el volumen total (el que se aporta a continuación) y no solamente el maderable:

Norte	Edad	Calidad I Ho=27 m (10 años)		Calidad II Ho=23 m (10 años)		Calidad III Ho=19 m (10 años)		Calidad IV Ho=15 m (10 años)	
		VT	CM	VT	CM	VT	CM	VT	CM
Brinzales	6	234,0	39,00	156,0	26,00	96,0	16,00	53,0	8,83
	8	319,0	39,88	217,0	27,13	138,0	17,25	79,0	9,88
	10	408,0	40,80	279,0	27,90	180,0	18,00	107,0	10,70
	12	485,0	40,42	337,0	28,08	223,0	18,58	134,0	11,17
	14	563,0	40,21	396,0	28,29	264,0	18,86	163,0	11,64
	16	631,0	39,44	452,0	28,25	304,0	19,00	188,0	11,75

Tabla 5: Cultivos de secano en el norte. Brinzales. Fernández López, A. 1982.

Norte	Edad	Calidad I Ho=27,9 m (10 años)		Calidad II Ho=25,2 m (10 años)		Calidad III Ho=22,5 m (10 años)		Calidad IV Ho=19,9 m (10 años)	
		VT	CM	VT	CM	VT	CM	VT	CM
Chirpiales	6	181,0	30,17	138,0	23,00	103,0	17,17	74,0	12,33
	8	302,0	37,75	231,0	28,88	172,0	21,50	121,0	15,13
	10	416,0	41,60	316,0	31,60	233,0	23,30	164,0	16,40
	12	510,0	42,50	391,0	32,58	288,0	24,00	202,0	16,83
	14	597,0	42,64	456,0	32,57	337,0	24,07	234,0	16,71
	16	670,0	41,88	505,0	31,56	373,0	23,31	263,0	16,44

Tabla 6: Cultivos de secano en el norte. Chirpiales. Fernández López, A. 1982.



Gráfica 3: Producción para eucalipto. Norte. Fernández López, A. 1982.

Las productividades a edades más tempranas (hacia los 6 años) que las usuales podrían proporcionar del orden de 6,5 t/ha y año en las peores calidades y en máxima ocupación del espacio aéreo y edáfico, hasta productividades superiores a los 28 t/ha y año.

No hay que olvidar que las tablas de producción, para estas edades más tempranas, son modelos numéricos ideales, que suponen la máxima ocupación del espacio aéreo y edáfico y la máxima efectividad en la utilización de los recursos de la estación forestal en la que se encuentran, en ausencia de huecos en la masa forestal y en condiciones selvícolas normales o de alta intensidad de intervención (y en este segundo caso, se habla de tablas de producción de silvicultura de referencia).

1.1.4 Producción de eucalipto según espaciamiento 2,5x2,5 en el Norte⁸

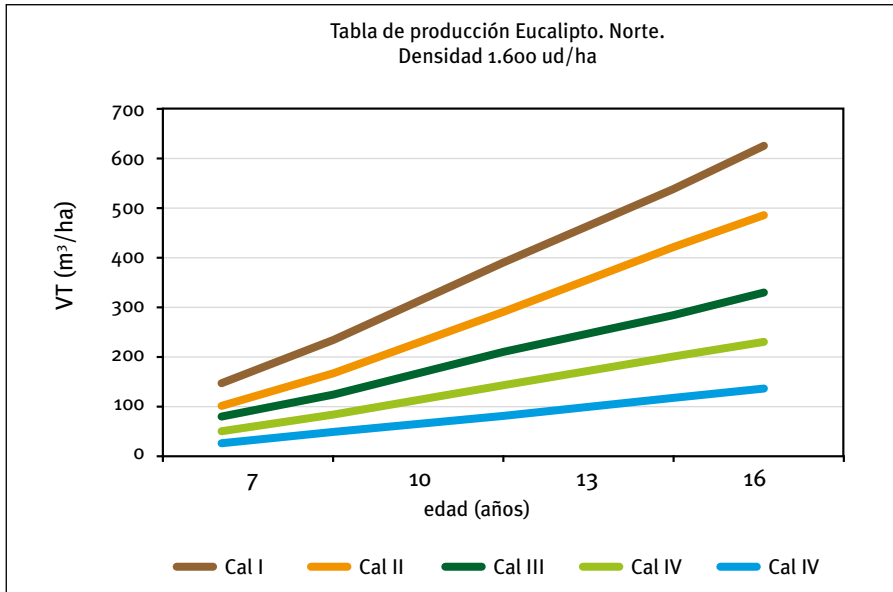
El estudio tuvo como objetivo conocer las producciones de eucalipto situado en el norte de España en una plantación en monte alto y 2 recepes, bajo un marco de 2,5x2,5, es decir, 1.600 pies/ha, cuyo destino final era trituración para pasta de papel.

Para el cultivo del eucalipto, en el caso de optar por densidades menores, con respecto a las técnicas actuales para producción de pasta papelera, existe otra colección de tablas, según diferentes marcos de plantación (uno similar al expuesto, de 2,5x2,5 m, y otro de menor densidad, 3x3, que se presenta en el punto 1.1), del mismo autor, y que presentan las producciones con respecto a biomasa total y no únicamente la de los fustes.

Norte	Edad	Calidad I Ho=26 m (10 años)		Calidad II Ho=23 m (10 años)	
		VT	CM	VT	CM
Marco	7	139,0	19,86	103,0	14,71
2,5x2,5	10	308,0	30,80	229,0	22,90
1.600	13	477,0	36,69	353,0	27,15
ud/ha	16	628,0	39,25	464,0	29,00

Norte	Edad	Calidad III Ho=20 m (10 años)		Calidad IV Ho=17 m (10 años)		Calidad V Ho=14 m (10 años)	
		VT	CM	VT	CM	VT	CM
Marco	7	74,0	10,57	50,0	7,14	31,0	4,43
2,5x2,5	10	164,0	16,40	110,0	11,00	69,0	6,90
1.600	13	251,0	19,31	170,0	13,08	106,0	8,15
ud/ha	16	329,0	20,56	222,0	13,88	139,0	8,69

Tabla 7: Producción eucalipto, espaciamiento 2,5x2,5. Norte. Fernández López, A. 1985.



Gráfica 4: Producción eucalipto, espaciamiento 2,5x2,5. Norte. Fernández López, A. 1985.

Conforme a estas tablas de producción, con espaciamientos de 2,5x2,5 m entre árboles, a edades más tempranas de las utilizadas para la producción de pasta papelera (7 años o menos), las producciones esperables serían entre 31 y 139 m³/ha (de 3,3 a 14,7 t/ha y año).

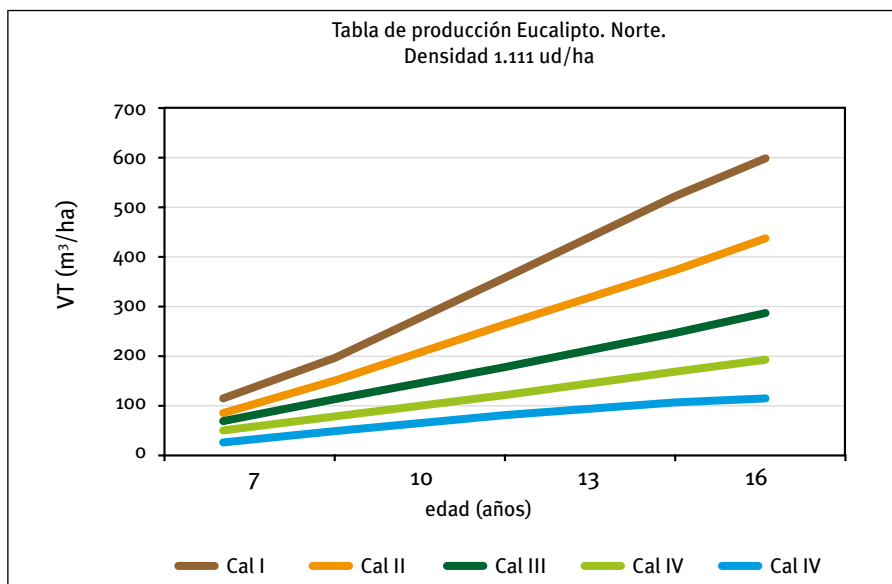
1.1.5 Producción de eucalipto según espaciamiento 3x3 en el Norte

En el caso de siembra de eucalipto a espaciamientos mayores, 3x3 m, 1.111 ud/ha, las producciones esperables serían del orden de 21 a 116 m³/ha y año a los 7 años (de 2 a 12 t/ha y año).

Norte	Edad	Calidad I Ho=26 m (10 años)		Calidad II Ho=23 m (10 años)	
		VT	CM	VT	CM
Marco	7	116,0	16,57	84,0	12,00
3x3	10	279,0	27,90	201,0	21,10
1.111	13	447,0	34,38	323,0	24,85
ud/ha	16	600,0	37,50	433,0	27,06

Norte	Edad	Calidad III Ho=20 m (10 años)		Calidad IV Ho=17 m (10 años)		Calidad V Ho=14 m (10 años)	
		VT	CM	VT	CM	VT	CM
		Marco	7	56,0	8,00	37,0	5,29
3x3	10	139,0	13,90	90,0	9,00	54,0	5,40
1.111	13	223,0	17,15	145,0	11,15	87,0	6,69
ud/ha	16	299,0	18,69	195,0	12,19	116,0	7,25

Tabla 8: Producción eucalipto, espaciamiento 3x3. Norte. Fernández López, A. 1985.



Gráfica 5: Producción eucalipto, espaciamiento 3x3. Norte. Fernández López, A. 1985.

Debido a que existe cierta diferencia en los resultados esperables (por ejemplo, en el caso 1.1.4 eucalipto Norte con espaciamientos 2,5x2,5, a los 7 años los resultados esperables son 31-139 m³/ha; sin embargo, en 1.1.5 con espaciamiento 3x3 los resultados esperables son 21-116 m³/ha) sería conveniente efectuar nuevas experiencias para comprobar, entre otros aspectos, los siguientes:

- Producciones a edades tempranas, tanto en brinzales como en chirpiales.
- Mejores edades de aprovechamiento para la producción y no agotamiento de cepas de forma temprana.

- Dimensiones del producto en cada caso y, en consecuencia, maquinaria a emplear, preferentemente de manera que se pueda emplear la ya existente y disponible en las zonas donde se dan estos cultivos.

Como conclusión del apartado 1.1 se puede indicar que si bien las producciones esperables en los primeros años utilizando procedimientos más tradicionales de explotación son menores, a lo largo de la vida de la plantación, cuando se trata de aprovechamiento a monte bajo y puesto que el sistema radical se va formando en las sucesivas cortas, probablemente las producciones totales se asemejen a las producciones con planteamientos de menor turno y marcos más cerrados.

1.2 EXPERIENCIAS DEL CULTIVO LEÑOSO DE CHOPO EN ITALIA⁹

Los agricultores del norte de Italia, con el apoyo de subvenciones, han plantado 5.000 ha de chopo SRC y han alcanzado notable experiencia en su gestión. Como en el caso de otros cultivos, el sistema está basado en la participación masiva de corporaciones privadas, que acompañan a los agricultores a lo largo de todo el proceso. Estas corporaciones son los principales actores, focalizando la producción hacia el sistema más apropiado, de acuerdo a las condiciones locales, al conocimiento y experiencia adquiridos.

Existen diferentes sistemas dependiendo del periodo de rotación, y en consecuencia de la densidad de plantación:

- Rotación a 1 año, 10.000 ud/ha.
- Rotación a 2 años, 7.000 ud/ha.
- Rotación a 5-6 años, 1.300-1.700 ud/ha.

Los costes desagregados de establecimiento y mantenimiento se incluyen en la Tabla 9:

Costes de establecimiento y mantenimiento de Chopo SRC Italia			
Sistema de rotación	1 año	2 años	5 años
Control plagas (€/ha)	250	250	250
Control hierbas (€/ha)	150	150	150
Fertilización (€/ha)	250	250	250
Plantación (€/ha)	700	500	350
Estaquillas (€/ha)	2.640	1.540	540
Coste total establecimiento (€/ha)	3.990	2.690	1.540
Coste mantenimiento (€/ha.año)	400	200	120

Tabla 9: Costes de establecimiento y mantenimiento de Chopo SRC Italia. CNR-Italia.

Los costes actuales de producción de la biomasa dependen de un número de factores que cambian según los casos y no son fáciles de predecir.

Las principales causas de incertidumbre son:

- a) El rendimiento del cultivo (t/ha y año).
- b) El número de rotaciones que se pueden realizar antes de su reemplazo.

Las experiencias italianas muestran que es razonable esperar un rendimiento o productividad de 30-35 toneladas de materia verde por hectárea y año. Esto está basado en la selección de un clon apropiado al sitio y en un correcto establecimiento y mantenimiento (especialmente el control de malas hierbas).

Los agricultores vendieron en 2007 a 15-20 €/t mat verde, para el Chopo SRC en campo, antes de la cosecha. Estos precios son interesantes en el contexto italiano, especialmente debido a que se obtienen subsidios en la mayoría de los casos. Las plantas eléctricas consideran un precio de compra límite de 40-45 €/t mat verde.

La cosecha y el transporte a planta debe oscilar entre 20-25 €/t mat verde para que sea económicamente factible. La cosecha del cultivo con rotación a 1-2 años se realiza fundamentalmente con la máquina CLAAS Jaguar+cabezal HS-2, donde cada unidad cosecha aproximadamente 300 ha/año.

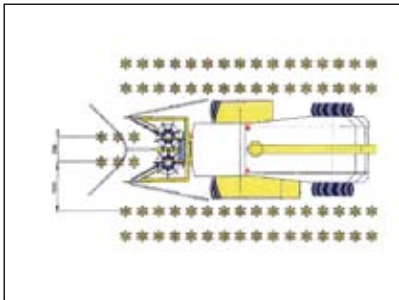


Figura 3.1: Esquema de trabajo con Claas Jaguar HS2. Figura 3.2: Cabezal Claas HS2.

El sistema se basa en una CLAAS y 2-4 tractores-trailers que reciben las astillas y las transportan a un punto de recolección, donde son recogidos por camiones que las llevan a planta. La productividad varía entre 7 y 44 toneladas de materia verde por hora, dando un coste medio de 12 €/t mat verde.

Las plantaciones con rotación a 5-6 años pueden ser cosechadas con los equipos forestales que existen en el mercado, lo que hace posible el establecimiento en

terrenos moderadamente inclinados. Además, estos cultivos ofrecen otros beneficios de flexibilidad de cosecha y de una alta concentración de biomasa en el sitio, lo que reduce los costes debido a incidencias en la recolocación de la maquinaria. La Tabla 10 muestra los rendimientos obtenidos en diferentes lugares durante el 2005-2006.

Rendimiento de cultivo de chopo SRC durante 2005-2006				
Lugar	Edad (años)	Rotación	Cosecha (t mat verde/ha)	Rendimiento (t mat verde/ha año)
Alpeolo	1	2	40,8	40,8
Bigli	1	2	25,5	25,5
Carpignano	2	2	71,9	36,0
Caorle	2	2	31,4	15,7
Arre	2	2	53,5	26,8
Ottobiano 1	5	1	107,4	21,5
Ottobiano 2	5	1	154,4	30,9

Tabla 10: Rendimiento del cultivo de chopo 2005-2006. CNR Italia.

1.3 EXPERIENCIAS DE CULTIVOS HERBÁCEOS¹⁰

Para la producción de biomasa sólida, las experiencias se han referido a cardo (*Cynara cardunculus*), caña común (*Arundo donax*), miscanto (*Miscanthus giganteus*), sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) o carinata (*Brassica carinata*). El cultivo del cardo (especie perenne) se perfilaba hace unos años como una interesante alternativa para los agricultores, pero el paso del tiempo ha puesto de manifiesto que tal vez las expectativas depositadas en esta especie eran en exceso optimistas para la climatología española, teniendo en cuenta algunas de las dificultades con las que en determinadas zonas ha tenido su cultivo (excesivo número de marras, con la consiguiente pérdida de producción, plagas...).

Según el informe *Trabajos preparatorios PER 2011–2020 de Dendros GF, S.L.* (que recopila información procedente del PSE ON CULTIVOS, ITGA y otros) para biomasa sólida de diferentes especies leñosas y herbáceas, se citan las siguientes informaciones:

Especie	Zona preferente de cultivo en la UE	Producción de - biomasa - (t m.s./ha y año) -			Observaciones
		Mínima	Media	Máxima	
Sauce (<i>Salix spp</i>)	Norte	6	8	12	Climas templado-fríos Necesidad de agua en contacto con las raíces permanentemente Tolera suelos arcillosos
Chopo (<i>Populus spp</i>)	Centro-Sur	8	20	30	Climas templados Necesidad de humedad en suelo: riegos Amplitud edáfica
Eucalipto (<i>Eucalyptus spp</i>)	Sur	8	10	15	Climas templado-cálidos No tolera heladas No tolera suelos arcillosos Producción variable según humedad
Sorgo dulce (<i>Sorghum bicolor L</i>)	Sur-Centro	12	20	45	Herbácea vivaz No tolera heladas Resistente a la sequía pero con exigencia en precipitaciones medias-altas para producción elevada
<i>Brassica carinata</i>	Sur	3	5 (6,5)	17	Herbácea anual Climas templado-cálidos No tolera heladas Precipitaciones bajas-medias
Cardo (<i>Cynara cardunculus L</i>)	Sur	8	15	35	Herbácea vivaz Pluviometría media-alta (>450 mm de otoño a primavera)

(continuación) -

Especie	Zona preferente de cultivo en la UE	Producción de biomasa (t m.s./ha y año)			Observaciones
		Mínima	Media	Máxima	
<i>Phalaris arundinacea</i>	Norte-Centro	7	10	13	Herbácea anual Climas templado-cálidos Pluviometría media-baja
<i>Miscanthus spp</i>	Centro-Sur	4	25	44	Herbácea vivaz Propagación por rizomas Pluviometría alta o riegos
Caña común (<i>Arundo donax</i>)	Centro-Sur	3	25	37	Herbácea vivaz Lugares con humedad permanente o encharcados Climas templados

Tabla 11: Cultivos energéticos para biomasa sólida en la UE. ITGA.

En cuanto a costes, se pueden citar los siguientes ejemplos de experiencias en España:

Fuente	Especie	Costes del cultivo (€/ha)		Producción (t m.s./ha)	Ayudas (€/ha)	
		(1)	(2)		Cultivo industrial	Cultivo energético
Valoriza energía	Sorgo forrajero	1.193,80	743,80	60	-	45
ITG – Agrícola	<i>Brassica carinata</i>	967,692	517,62	(6)-11-15-(20)	-	45

Tabla 12: Experiencias Valoriza e ITG Agrícola en España. ITGA.

(1) Con costes de arrendamiento del suelo.

(2) Sin costes de arrendamiento del suelo.

El resultado de estas experiencias indica los costes de producción considerando la no existencia de ayudas y sí los costes de arrendamiento de suelo, de unos 20 €/t para el sorgo forrajero y de entre 64,5-88 €/t ms para *Brassica Carinata* cuando las producciones alcanzan 15-11 t m.s./ha y año.

2 Biomásas forestales

La biomasa de origen forestal para uso energético en este documento se refiere principalmente a los restos procedentes de procesos forestales, tanto de explotaciones forestales (raíces, tocones, ramas, cortezas, hojas) como de la limpieza de montes y operaciones silvícolas.

Son numerosas las experiencias realizadas en España sobre aprovechamiento de residuos forestales para su utilización energética, tanto térmica (calor en mayor medida que frío) como eléctrica. En consecuencia, las referencias documentales en Internet son igualmente bastante numerosas, aunque con cierta dispersión y

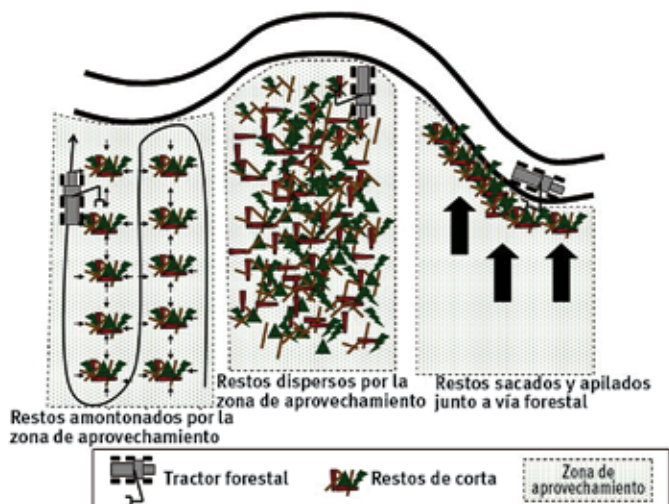


Figura 4: Planificación del aprovechamiento.

heterogeneidad en la presentación de resultados. Las mayores limitaciones que afectan a la manipulación de la biomasa forestal son, por un lado, su dispersión en las zonas de aprovechamiento, y por otro lado, su *baja densidad* aparente, que dificulta y encarece el transporte. Obviamente, desde el punto de vista de la viabilidad económica del aprovechamiento de los restos, no se contempla sino la utilización de maquinaria para estas labores, lo que limita las zonas de aprovechamiento a aquellas en las que la pendiente es inferior al 35% en prácticamente todos los casos. Como es natural, la mayor parte de las experiencias se encaminan hacia la resolución de estas dos dificultades.

La resolución de la primera de ellas, la dispersión, se basa en planificar adecuadamente el aprovechamiento. Se planifica, en consecuencia, el aprovechamiento principal, de tal manera que se produzca la menor dispersión posible de restos:

- En cortas finales continuas en superficie (cortas a hecho; cortas diseminatorias o aclaratorias; cortas de regeneración por aclareo sucesivo, ya sea uniforme, por fajas, bosquetes o cantones) o en cortas intermedias de peso fuerte (claras o clareos de eliminación de masa inicial superior al 30% del área basimétrica):
 - Agrupación de restos de corta en montones, líneas o calles de desem-bosque.
 - Aprovechamiento del árbol entero y procesado en pista, con separación de productos finales (fustes) y restos (raberón, ramas y hojas).
- En cortas intermedias de peso moderado a débil, agrupación de restos en calles o montones o saca de árbol completo.

Sin embargo, la situación actual más habitual es la dispersión general de los restos del aprovechamiento por la zona de corta.

Se ha desarrollado para la recogida de restos un apero de tipo rastrillo frontal con grapas hidráulicas independientes sobre tractor (de cadenas o ruedas) de pequeña potencia que facilita el amontonado, alineado o arrastre (empuje) de restos a vía forestal o a calle.

En cuanto a la paliación de la segunda dificultad, es decir, la baja densidad, las tecnologías de recogida se basan, bien en reducir el tamaño del material (astillándolo), o bien en comprimirlo hasta formar unidades compactas de mayor densidad (empacado de restos forestales).

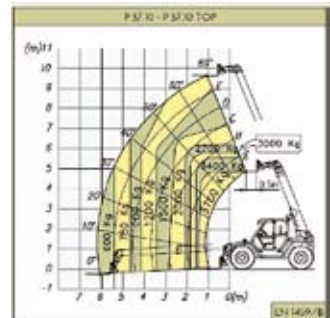


Figura 5: Esquema telescópico para paques.

Existen en la actualidad al menos 3 máquinas forestales específicas, desarrolladas por las casas comerciales Timberjack y Valmet (Finlandia) y el prototipo español de TRABISA, de tecnología radicalmente diferente a las otras dos. Esta última está basada en la compactación mediante prensa hidráulica y cizallado del material para su dimensionado final, frente al uso de la motosierra en las otras dos. Mientras que la empacadora Timberjack (que ha cambiado recientemente a John Deere) tiene la ventaja de fácil movilidad en terrenos mojados e inclinados, la de Trabisa está más adaptada al corte de materiales contaminados con piedras o tierra.

Existe otro fabricante español, DINGOMA, que está desarrollando una empacadora aprovechando las experiencias adquiridas.



Al margen de los restos de aprovechamientos forestales, se plantea la posibilidad de puesta en producción de los montes que histórica y tradicionalmente suministraban energía a la población: los montes de quercóideas en forma principal de masa de monte bajo, fundamentalmente los montes de encina (*Quercus ilex*), rebollo (*Quercus pyrenaica*), quejigo (*Quercus faginea*), *Quercus canariensis* y *Quercus pubescens*, sin olvidar otros como los hayedos (*Fagus sylvatica*), tratados a monte bajo. Los métodos de gestión sostenida y sostenible de estas masas forestales son perfectamente conocidos por el sector forestal, y estos montes pueden constituir un reservorio de materia prima energética de primera magnitud en determinadas zonas.

Figura 6: Montes de Quercus.

Especie	Tratamiento/ Proceso	Fuente	Costes (€/t)		Observaciones
			Mínimo	Máximo	
Pinos/ coníferas	Cortas a hecho	CIS – Madera	27,01	27,41	
	Empacado	ANFTA	15,00	42,30	
	de restos	FERÁLAVA	26,11	31,51	
	Cortas a hecho	CIS – Madera	25,91	35,66	
	Astillado de restos	CESEFOR – ETSIM – JCyL	11,53	26,65	
	Claras				
	Empacado de restos	BIO – SOUTH	19,21	21,78	
	Claras				
	Astillado de restos	CESEFOR – ETSIM – JcyL	22,64		
Eucalipto	Cortas a hecho				
	Astillado de restos	CIS – Madera	21,52	30,66	
		CIS – Madera	25,14	29,54	
	Cortas a hecho				
	Empacado de restos	FERÁLAVA	17,49	30,70	El coste mínimo no incluye el coste combinado de saca y transporte
Quercus	Resalveo				
	Astillado de restos	CESEFOR – ETSIM – JcyL	54,00		Incluye costes de transporte
Chopo	Corta a hecho				
	Astillado de restos	CESEFOR – ETSIM – JcyL	24,92		
	Corta a hecho	ANFTA	33,00		
	Empacado	BIO – SOUTH	13,00		
	de restos	FERÁLAVA	17,31	32,01	El coste mínimo no incluye el combinado de saca y transporte

Tabla 13: Resumen de experiencias reales.

2.1 EXPERIENCIAS SOBRE APROVECHAMIENTO DE BIOMASAS FORESTALES

Como resumen de las experiencias reales que se presentan, la tabla anterior expone la gran dispersión de resultados que se desprenden de ellas, incluso en situaciones en teoría parecidas, dependiendo fundamentalmente de la organización de los trabajos, de la densidad (t/ha) de restos por hectárea inicial, de la disposición de los restos sobre el terreno (dispersos, amontonados o alineados o apilados junto a vías de desembosque) y de las incidencias que la maquinaria haya podido sufrir por averías, desplazamientos, etc. No incluye costes de transporte, salvo excepciones.

Los costes expuestos se presentan en euros por tonelada de materia seca al aire, esto es, con humedades que pueden oscilar entre el 55% y el 25%, según las condiciones propias de cada aprovechamiento. Esto es así porque tanto el empaclado como el astillado se vienen a realizar en el propio monte, preferentemente con cierto contenido en humedad (puesto que se da un mejor funcionamiento y, por tanto, eficiencia de la maquinaria a emplear), y también porque a la hora de transportar el material, el peso no suele ser nunca la limitación, sino el volumen, ya que los camiones que se emplean tienen capacidad suficiente para transportar toneladas elevadas pero presentan limitaciones importantes al volumen por el tamaño de la caja.

2.1.1 Experiencia CIS Madera⁴¹ en Galicia

El proyecto realizado por CIS-Madera en colaboración con las Universidades de Vigo y Santiago tuvo como fin analizar la valoración de la biomasa procedente de residuos forestales. El trabajo contempló la modelización de la producción de biomasa forestal, las tecnologías avanzadas de recogida, la caracterización de los residuos y el estudio de las implicaciones ambientales del aprovechamiento de los restos de corta de pino y eucalipto.

Los rendimientos se refieren a toneladas de materia verde por hora, a humedad variable oscilando entre 30-50%. Con el fin de proporcionar costes horarios homogéneos entre sí y con otras experiencias, se han utilizado los costes de maquinaria que proporcionaron las tarifas TRAGSA 2007.

Otros costes a tener en consideración serían: el traslado de la empacadora/astilladora a la explotación forestal, el coste de la biomasa en origen, las pérdidas de materia durante el periodo de almacenamiento, el tratamiento de la astilla o paca, el transporte desde la explotación forestal a planta, así como los costes de gestión.

Pinus pinaster. Densidad (t/ha) 44:

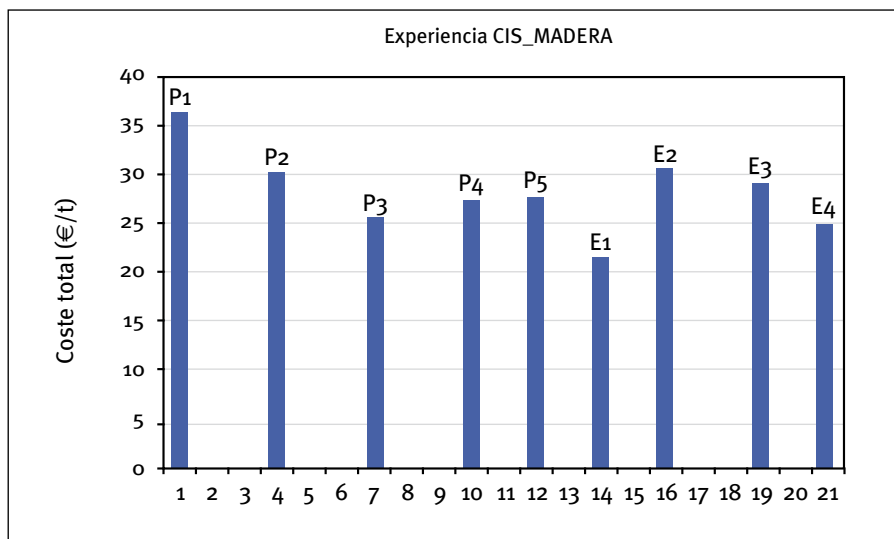
Tratamiento	Proceso y Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
P1–Corta a hecho; restos amontonados	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	3,20	16,54	35,66
	Astillado. Astilladora chipharvester Brucks 803 sobre autocargador Valmet 892	16,17	10,21	
	Desembosque de astilla a parque. Autocargador Valmet 895	10,74	8,90	
P2–Corta a hecho; restos apilados junto a vía	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	3,20	16,54	30,30
	Astillado. Astilladora chipharvester Brucks 803 sobre autocargador Valmet 892	23,89	6,91	
	Aproximación de astilla a contenedor general. Autocargador Valmet 895	13,97	6,84	
P3–Corta a hecho; restos apilados junto a vía	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	3,20	16,54	25,91
	Astillado. Astilladora semimóvil de alta capacidad Pezzolato PHT 1200	13,60	6,76	
	Tractor con pinza frontal	13,60	2,61	
P4–Corta a hecho; restos amontonados	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	3,20	16,54	27,01
	Empacado. Fiberpac 370 B sobre autocargador Timberjack 1210 B	7,45	10,47	
P5–Corta a hecho; restos apilados junto a vía	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	3,20	16,54	27,41
	Empacado. Fiberpac 370 B sobre autocargador Timberjack 1210 B	7,18	10,87	

(continuación)

***Eucalyptus sp.* Densidad (t/ha) 40:**

Tratamiento	Proceso y Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
E1–Corta a hecho; restos dispersos	Astillado. Astilladora chipharvester Brucks 803 sobre autocargador Valmet 892	15,20	10,86	21,52
	Desembosque de astilla. Autocargador Valmet 895	8,97	10,66	
E2–Corta a hecho; restos apilados junto a vía	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	4,00	13,24	30,66
	Astillado. Astilladora chipharvester Brucks 803 sobre autocargador Valmet 892	24,40	6,77	
	Aproximación de astilla a contenedor general. Autocargador Valmet 895	8,97	10,66	
E3–Corta a hecho; restos dispersos	Fiberpac 370 B sobre autocargador Timberjack 1210 B	6,67	11,69	29,54
	Saca de pacas a parque. Autocargador Valmet 895	5,36	17,85	
E4–Corta a hecho; restos apilados junto a vía	Amontonado de restos. Tractor apilador de restos	3,20	16,54	25,14
	Empacado. Fiberpac 370 B sobre autocargador Timberjack 1210 B	9,07	8,60	

Tabla 14: Experiencias CIS–Madera.



Gráfica 6: Experiencia CIS-Madera. Elaboración ESCAN.

2.1.2 Experiencia CESEFOR¹²

Experiencias sobre diferentes situaciones en Castilla y León, entre los meses de octubre de 2006 y mayo de 2007, en aprovechamientos de *Q. pyrenaica* (rebollo), *Pinus sylvestris*, *pinus pinaster* y *chopo*. Hay referencias a otras experiencias forestales realizadas en otros lugares. Los costes incluyen gastos generales empresariales y beneficio industrial, pero en ningún caso la retribución a la propiedad por los restos del aprovechamiento.

Quercus pyrenaica. t/ha 50:

Tratamiento	Proceso y Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Resalveo: Apeo con cosechadora con cabezal adaptado mediante “uña” adicional al trabajo como “multitalador”. Astillado en cargadero con astilladora sobre camión	Apeo. Procesadora multiárbol Saca. Autocargador Astillado o triturado fijo. Astilladora o trituradora sobre camión Transporte a central. Camión			54,00

Pinus Sylvestris*. t/ha 4:(continuación)*

Tratamiento	Proceso y Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Clara: saca de árbol completo y triturado en cargadero con astilladora semimóvil	Apeo. Cosechadora convencional	6,32	11,16	26,64
	Saca. Autocargador	6,54	8,25	
	Triturado en cargadero y carga. Triturado	31,64	3,23	
	Transporte a central. Camión		4,00	

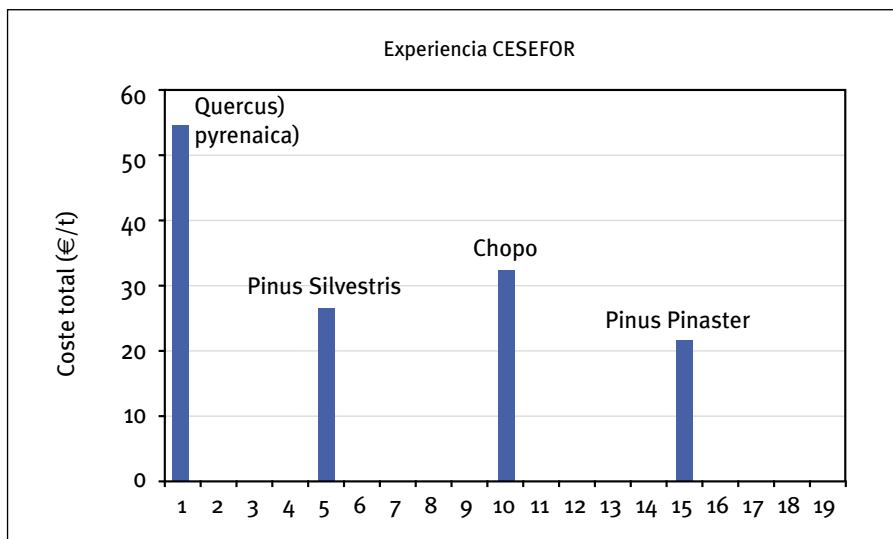
***Chopo*. t/ha 106,1:**

Tratamiento	Proceso y Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Corta a hecho	Apeo y desrame. Manual	2,096	(9,45)	31,92
	Desembosque de fustes	5,87	(8,60)	
	Cargadora frontal			
	Apilado de restos. Cargadora frontal	21,05	2,38	
	Astillado, astilladora	3,36	22,54	
	Transporte a central		7,00	

***Pinus pinaster*. t/ha 40,3:**

Tratamiento	Proceso y Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Corta a hecho; procesado de restos en calles con astilladora móvil	Apeo. Manual	26,0		21,33
	Procesado. Procesadora multiárbol	19,6		
	Saca. Autocargador	9,2		
	Astillado móvil.	10,7	11,5	
	Astilladora sobre autocargador			
	Transporte de astilla. Camión		9,8	

Tabla 15: Experiencia CESEFOR. Tolosana, E, Y. Ambrosio, R. Laina, R. Martínez-Ferrari y F. Pinillos: “Rendimientos y costes de diferentes aprovechamientos de la biomasa forestal: Las experiencias en curso en Castilla y León”.



Gráfica 7: Experiencias CESEFOR. Elaboración ESCAN.

2.1.3 Experiencia FERÁLAVA¹³

FERÁLAVA es una sociedad que fue creada con el objetivo de construir y explotar una planta de generación de energía eléctrica de 22 MW alimentada con 235.000 t/año de biomasa forestal y con una generación de energía eléctrica anual de 167.200 MWh/año. Como paso previo del proyecto se desarrolló un plan de pruebas utilizando la empacadora forestal Fiberpack 1490, realizándose diferentes experiencias con eucalipto, pino y chopo en diferentes escenarios. El objetivo final del proyecto no se llegó a cumplir debido a que en aquel momento las condiciones económicas no eran favorables para el desarrollo de un proyecto de estas características.

Estimaciones de costes de aprovechamiento de biomasa forestal (eucalipto, pino y chopo) en la cornisa cantábrica, de FERÁLAVA. Las experiencias muestran que la disposición del residuo (amontonado) y la limpieza de restos de tierra y piedras, aumentan el rendimiento de la empacadora evitando las frecuentes paradas por avería de la máquina, fundamentalmente por la rotura de cadenas de corte de los fardos y, en menor medida, por las roturas de las botellas de los hidráulicos.

Eucalipto

Tratamiento	Proceso	Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Corta final: restos esparcidos/ amontonados	Empacado	Fiberpack 1490-D	4,25-5,95	11,4-19,1	21,5
	Saca			4,5-7	-36,1
	Transporte			6,0-10,0	

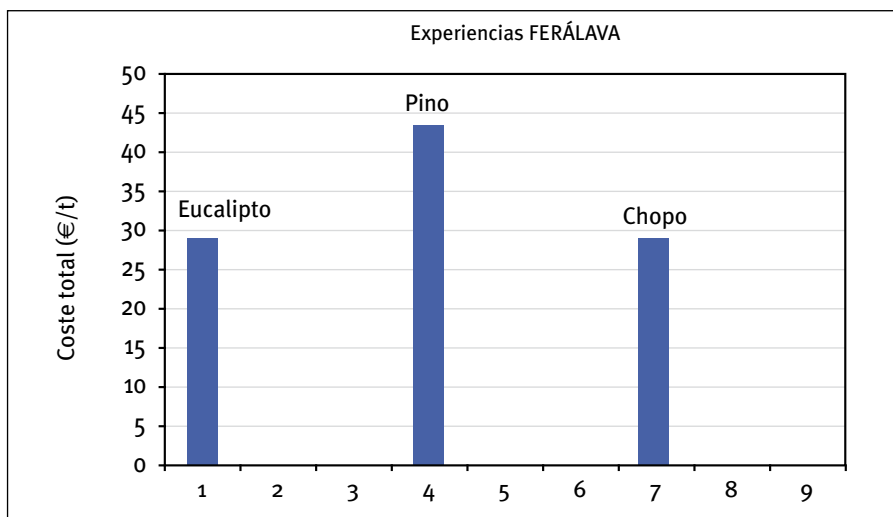
Pino

Tratamiento	Proceso	Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Corta final: restos amontonados	Empacado	Fiberpack 1490-D	6,38	12,2-23,6	23,2
	Saca			4,5-7	-40,6
	Transporte			6,0-10,0	

Chopo

Tratamiento	Proceso	Maquinaria	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Corta final: restos amontonados	Empacado	Fiberpack 1490-D		12,2-23,6	21,7
	Saca	Transporte		9,0-12	-35,6

Tabla 16: Experiencia FERÁLAVA. (Fomento de Energías Renovables de Álava, S.A).



Gráfica 8: Experiencia FERÁLAVA. Elaboración ESCAN.

2.1.4 Experiencia ENERSILVA¹⁴

ENERSILVA es un proyecto europeo de cooperación transregional financiado por el programa Interreg III B SUDOE. Su finalidad principal es dinamizar a los propietarios forestales particulares del sur de Europa en el aprovechamiento energético de la biomasa forestal primaria. En particular, ENERSILVA estudia las variables que inciden sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal en los bosques y sobre la implantación de centrales de biomasa para producción de energía. Las especies objeto de aprovechamiento son de los géneros *Pinus*, *Eucalyptus*, *Quercus*, *Castanea* y *Populus*.

Con el fin de analizar su comportamiento económico, ENERSILVA divide el circuito en dos fases: generación de la biomasa y aprovechamiento de la biomasa. Cada una de estas fases tiene una serie de costes asociados que se describen a continuación:

- Un coste de “generación”, procedente del desrame y descope (y en su caso, de clareo y poda) del tratamiento selvícola, incrementado en un 15% de retribución al propietario por esa Biomasa Forestal Producida (BFP). Además, incrementa este coste de generación con unos gastos de gestión del propietario (también en un 15% sobre el coste intrínseco de generación) que ENERSILVA cifra entre 20 y 60 €/ha y año.
- Por otro lado, el tradicional coste de aprovechamiento (recogida y apilado,

saca, astillado o empacado y transporte a central, con distancia de transporte de 30 km), que se incrementa en un 15% para cubrir los Gastos Generales y Beneficio Industrial de las empresas de aprovechamiento.

Con respecto a los costes que presenta ENERSILVA, sólo son comparables con otras experiencias los costes de aprovechamiento y transporte, debido a que ENERSILVA incorpora la retribución por la biomasa y el beneficio empresarial. No obstante, se presentan a continuación dichos costes, en €/t de materia verde, con un 35% de humedad:

	Galicia		Localización País Vasco		Cataluña	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Superficie media de la explotación (ha)	1		2		15	
Márgenes de ciclo productivo (años)	15	60	15	70	15	70
Márgenes de posibilidad (m ³ /ha/año)	7	23	5	22	4	20
Costes	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Coste generación (€/t)	12	26	15	27	15	25
Coste generación sin retribución por BFP ni gastos de gestión	9,23	20,00	11,54	20,77	11,54	19,23
BFP Clareo+poda saca semimecanizada	74	85			75	95
BFP Clareo+poda saca mecanizada	48	55	60	70		
BFP Clara, saca semimecanizada	54	72				
BFP Cortas finales saca mecanizada	41	46	42	62		

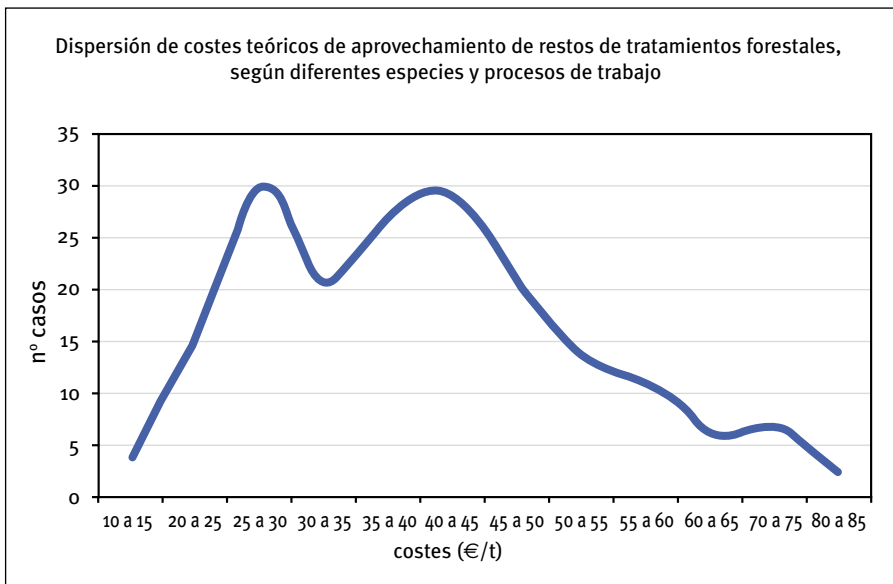
(continuación)

	Localización					
	Norte y Centro de Portugal		Aquitania			
Superficie media de la explotación (ha)	1		5			
Márgenes de ciclo productivo (años)	15	45	20	80		
Márgenes de posibilidad (m ³ /ha/año)	9	23	4	20		
Costes	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo		
Coste generación (€/t)	15	22	18	30		
Coste generación sin retribución por BFP ni gastos de gestión	11,54	16,92	13,85	23,08		
BFP Clareo+poda saca semimecanizada			50	55		
BFP Clareo+poda saca mecanizada						
BFP Clara, saca semimecanizada						
BFP Cortas finales saca mecanizada	29	54	55	70		
	España		Francia		Portugal	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Coste total en planta BFP (astilla), incluyendo costes de generación	53	120	69	100	39	75
Coste total en planta BFP (astilla), sin costes de generación	41	95	50	70	29	54

Tabla 17: Experiencias ENERSILVA.

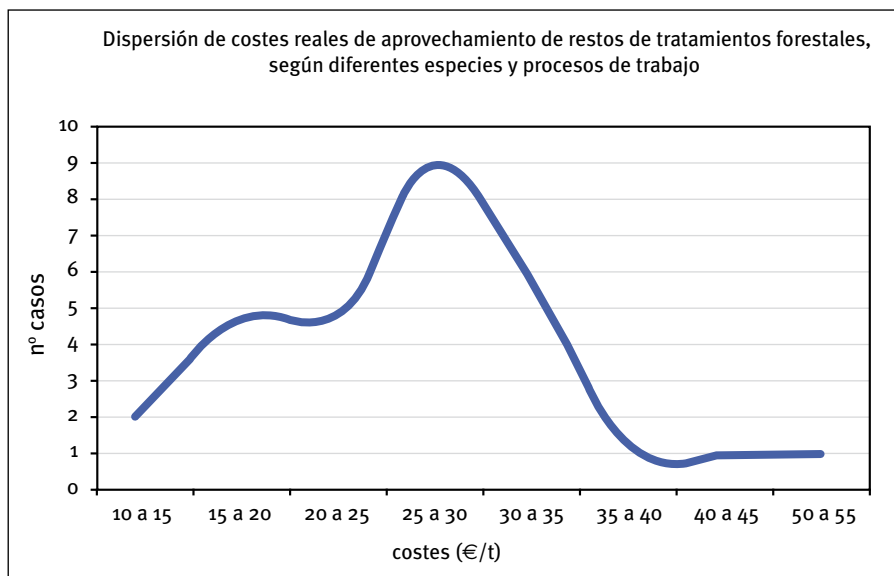
2.2 DISPERSIÓN DE COSTES

Para tener una idea gráfica de la dispersión de costes teóricos, de acuerdo con las publicaciones de CIEMAT y la Junta de Castilla y León, se presenta el siguiente gráfico en el que se representa la frecuencia de casos de diferentes aprovechamientos de restos de tratamientos selvícolas ordenados por sus costes de obtención por tonelada verde de biomasa. Aun con sólo estos dos ejemplos y sin contemplar otros casos, puede observarse que la dispersión de costes es muy amplia.



Gráfica 9: *Dispersión de costes teóricos de aprovechamiento de restos de tratamientos forestales. Trabajos preparatorios PER 2011-2030. IDAE.*

Si se hace la misma representación para los casos reales expuestos en las anteriores páginas, el gráfico de dispersión de costes de experiencias reales es el siguiente:



Gráfica 10: *Dispersión de costes reales de aprovechamiento de restos de tratamientos forestales. Trabajos preparatorios PER 2011-2030. IDAE.*

Como puede comprobarse, la media de las experiencias reales se sitúa por debajo de la media de los casos teóricos y coincidiendo con uno de los picos del gráfico.

3 Biomásas agrícolas

Así como en el ámbito del aprovechamiento de restos de trabajos forestales existen bastantes referencias, no se pueden localizar con la misma facilidad en el caso del aprovechamiento de los restos de cultivos agrícolas, si bien son igualmente numerosas las experiencias.

Entre ellas destacan el aprovechamiento de paja de cereal en el entorno de la planta de producción de energía eléctrica que Acciona-Energía tiene en Sangüesa (Navarra) y las experiencias con un tractor prototipo que recoge y astilla simultáneamente los restos de poda de olivar en Andalucía, promovidas por el Ente Andaluz de la Energía y Valoriza Energía (Grupo Sacyr). Los datos referentes a las experiencias realizadas están recogidos en el apartado 3.2.

3.1 GENERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOMASAS AGRÍCOLAS

A efectos de proceso de siega y recolección, los equipos para biomásas agrícolas herbáceas para aprovechamiento energético son los mismos que para cultivos herbáceos enfocados a la alimentación humana o animal.

Los costes de recolección de los restos de cultivos agrícolas herbáceos, fundamentalmente referidos a cereal (pajas), para la utilización de los mismos con fines energéticos, están basados en la utilización de la maquinaria de recolección y empaquetado, y se trata de costes muy estudiados y, por tanto, conocidos en el campo agrario.

Para el caso de biomásas agrícolas leñosas y en concreto en el caso de la vid, el agricultor poda anualmente las viñas, en la gran mayoría de los casos con un podado manual (tijeras de podar) y a posteriori se procede a la recogida y apilado

de sarmientos (usando un sarmentador). La poda es la operación agrícola que genera el residuo por lo que su justificación vendrá dada por criterios de cultivo y no por criterios energéticos.

Tras la corta se procede a la extracción o retirada del material a lugares accesibles. Para la extracción se utiliza maquinaria móvil que debe estar adaptada a las condiciones específicas de cada tipo de cultivo y suelen ser tractores con el implemento correspondiente: sarmentador hidráulico de una o dos cajas o autocargadores, para su posterior transporte al parque de almacenamiento desde las viñas. El sarmiento de vid, dada su escasa humedad, es apilado directamente en los parques de almacenamiento (humedad habitual para consumo del 20% en base húmeda).

En lo que respecta a la poda del olivo, el proceso de obtención de esta biomasa es similar al de la poda de la vid. Los cambios se encuentran en las tecnologías a emplear dadas las peculiaridades de cada especie (el olivo es una especie arbórea y la vid es una especie arbustiva rastrera y trepadora) y de sus tratamientos agrícolas. Para la poda de los olivos se utilizan distintas herramientas atendiendo al grosor de la rama a cortar.



Figura 7: Sistema autopropulsado de hilerado y triturado Valoriza.

A partir de este punto la gestión de los residuos se puede conducir por dos alternativas diferentes, independientemente de su origen:

- Triturado en campo.
- Empacado para su posterior envío a planta.

La recogida de restos de labores en cultivos de leñosas (poda de olivar, de almendro, de vid y de otros frutales) son tratamientos bien estudiados. La novedad se enmarca en la utilización de medios mecánicos para su mejor procesado y transporte.

En el caso de la poda del olivar son destacables las experiencias de recogida y astillado simultáneo de los restos mediante una máquina experimental utilizada en Andalucía. -

En el caso de recogida mecanizada de la poda del olivar es importante, de acuerdo con las experiencias realizadas, proceder a un hilerado del ramón con máquina hileradora en montones de 1,5 m de anchura y 1 m de altura como máximo.

En el caso de la poda de frutales, concretamente en naranjales de la Comunidad Valenciana, el prototipo de empacadora de restos leñosos agrícolas de TRABISA es el otro referente de mecanización de estas labores.

3.2 EXPERIENCIAS SOBRE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

3.2.1 Experiencia Ayuntamiento de Cartaya¹⁵

Este estudio ha sido realizado por el Ayuntamiento de Cartaya (Huelva) y está referido a la poda de frutales (cítricos: naranjos, fundamentalmente).

Hay que advertir que algunos de los datos de costes y de rendimientos están estimados a partir de las tarifas TRAGSA 2000 para determinados trabajos y que se trata, en definitiva, de un estudio con una importante carga de suposiciones teóricas.

RESTOS DE APROVECHAMIENTO DE FRUTALES. D/tha 4,50:

Tratamiento	Proceso	Maquinaria/Recursos	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Recogida de restos	Recogida y - astillado - mecanizados	Recogida, saca y acordonado	0,19	41,92	96,00
		Cosechado y desembosque: Tractor -oruga 90 CV con Cosechadora BRUNET BMR 400	0,75	47,00	

(continuación)

Tratamiento	Proceso	Maquinaria/Recursos	Rendimiento (t/h)	Coste (€/t)	Coste total (€/t)
Recogida de restos		Carga y transporte: Camión autocargable		7,08	96,00
		Recogida, saca y acordonado	0,19	41,92	
	Astillado manual	Astillado y desembosque: Tractor oruga 90 CV con astilladora suspendida BRUKS 650/100 dotado de remolque; astillado de alimentación manual	0,34	170,03	219,03
		Carga y transporte: - Camión autocargable		7,08	-

Tabla 18: Experiencia Ayuntamiento de Cartaya. SODEAN. 2000. Estudio del análisis de potencial y coste de las podas de olivar en la provincia de Jaén.

3.2.2 Experiencia en Jaén en el año 2000¹⁶

Experiencia realizada por SODEAN (Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía, S.A.), AGENER (Agencia de Gestión Energética de la provincia de Jaén), la Diputación de Jaén y la Universidad de Jaén.

La experiencia aporta datos sobre recogida de restos de poda de olivar (ramas de diámetro inferior a 10 cm, ramón y hoja), para el estudio del potencial y coste de las podas de olivar en la provincia de Jaén, en el año 2000, en varias fincas de olivar de regadío y secano.

Olivo regadío:

Tratamiento	Proceso	Densidad (t/ha)	Superficie (ha)	Costes (€/t)	Producto
Poda bianual fuerte	Hilerado manual; Astilladora manual; tractor + remolque -	4,468	1,3	21,895	Astilla
Poda bianual fuerte	Hilerado mecanizado; - Astilladora manual; tractor + remolque	2,427	6,2	22,319	Astilla

(continuación)

Olivo regadío:

Tratamiento	Proceso	Densidad (t/ha)	Superficie (ha)	Costes (€/t)	Producto
Poda bianual fuerte	Hilerado mecanizado; astillado automático	3,058	1,78	23,240	Astilla
Poda bianual fuerte	Hilerado manual calles alternas; astillado automático	3,024	1,44	24,886	Astilla
Poda bianual fuerte	Hilerado manual; astillado automático	3,000	2,24	27,699	Astilla

Tabla 19: Experiencia Jaén 2000. SODEAN. 2000. Estudio del análisis de potencial y coste de las podas de olivar en la provincia de Jaén.



4 Panorámica general

El aprovechamiento de biomásas procedentes de trabajos y cortas en el medio forestal está bien estudiado, si bien la dispersión de los datos y de los resultados obliga a que en cada caso concreto deban estudiarse los procesos, maquinaria, rendimientos y disponibilidades de la biomasa de manera concreta, debiendo tenerse en cuenta la importante posibilidad de puesta en producción otra vez de los montes de especies tradicionalmente energéticas en España.

Lo mismo puede decirse de los residuos o subproductos agrícolas, especialmente los herbáceos, cuya mecanización es fácil y se lleva realizando de una manera rutinaria desde hace mucho tiempo. El conocimiento de procesos y costes está igualmente estudiado. Algunas labores, como el aprovechamiento de los restos de la poda de olivar, de la viña o de cultivos de frutales leñosos pueden exigir el desarrollo, perfeccionamiento o adaptación de maquinaria existente.

El caso de los cultivos herbáceos para la producción de biomasa, a pesar de que presentan unos costes razonablemente estudiados (el ITGA cuenta con abundantes experiencias al respecto) y no excesivamente elevados, una mecanización que puede considerarse rutinaria y unos procedimientos de cultivo que cada vez son más conocidos, conviene analizar con cuidado la rentabilidad real para el agricultor teniendo en cuenta los precios actuales de los productos agrarios.

Por último, el caso de las nuevas masas forestales se encuentra poco estudiado en España, excepto el caso del eucalipto en secano, tanto en el norte como en el suroeste, demostrándose que puede ser una alternativa importante para la producción de biomasa sólida con fines energéticos. El caso del cultivo de especies forestales en regadío (en España, habría que restringirse únicamente al chopo, *Populus sp.*) es necesario seguir estudiándolo, sobre todo en los aspectos de la

idoneidad de especies, variedades o clones, según las condiciones de cada estación. Igualmente, se debe seguir experimentando con densidades de plantación y ciclos de producción diferentes de los probados hasta ahora, de acuerdo con las tendencias que parecen seguirse en otras partes de Europa.

La experiencia italiana de producción y aprovechamiento del chopo en un espacio de 5.000 hectáreas con diferentes sistemas, arroja resultados prometedores, si bien existen incertidumbres que afectan a los costes de establecimiento y mantenimiento del cultivo.

Como en el caso de otros cultivos, el sistema italiano está basado en la participación masiva de corporaciones privadas, que acompañan a los agricultores en todo el proceso, dirigiendo la producción hacia el sistema más apropiado, de acuerdo a las condiciones locales, al conocimiento y a la experiencia adquiridos.

En conclusión, para la obtención de resultados fiables, hay que orientar las acciones hacia proyectos reales, basados en las condiciones locales, la experiencia y el conocimiento adquiridos, que proporcionen resultados reales de explotaciones continuadas y que deberán ser evaluados. La realidad de los mercados demuestra que los costes de la obtención de la biomasa son independientes del precio que se puede llegar a pagar por ésta en el mercado.

5

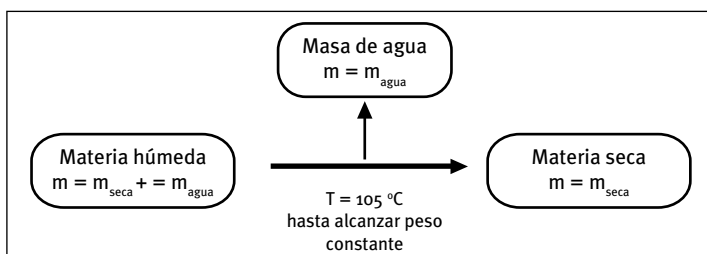
Glosario de términos

Densidad real y aparente:

- La **densidad real** es una propiedad física que está definida por la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características del material.
- La **densidad aparente** es la relación entre la masa del producto y el volumen ocupado por el mismo en el espacio.

Normativa: CEN/TS 15103: 2005. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la densidad aparente.

Humedad total según se recibe: la medición más precisa es la medición mediante secado en un horno. Consiste en medir la masa del sólido a prueba en una balanza y calentarlo luego en un horno cerrado. El horno se pone a una temperatura que asegura una humedad estacionaria muy pequeña en el sólido, (a 105 °C para el caso de la madera), y tal temperatura se mantiene durante un tiempo que asegura el estacionamiento de la humedad del sólido (24 horas) hasta que alcance un peso constante. Comparando la masa inicial y la final:



El resultado se expresa en % de agua, tanto sobre la muestra inicial (base húmeda) como sobre el producto final (base seca):

Humedad en base húmeda:

$$H_h [\%] = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{seca}} + m_{\text{agua}}} \cdot 100$$

Humedad en base seca:

$$H_s [\%] = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{seca}}} \cdot 100$$

m_{agua} es la masa del agua disuelta por un gas o absorbida por un sólido, en [kg]. -

m_{seca} es la masa de gas o sólido seco, en [kg]. -

De lo anterior resulta inmediato que la humedad en base seca será siempre mayor que la humedad en base húmeda. Un elevado grado de humedad hace disminuir el poder calorífico y aumentar el consumo de combustible. -

Normativa: según la norma UNE-CEN/TS 14774-1 EX: 2004. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia.

Forma y tamaño: la forma de la biomasa antes y después del pretratamiento influye directamente en los costes de manipulación, almacenamiento y transporte. Un tamaño mediano y pequeño, pero homogéneo, de la pieza de combustible, facilita la automatización de los sistemas y mejora la combustión. -

Granulometría: determinación del tamaño de partícula expresado como un porcentaje de la masa total de las fracciones. -

Normativa: CEN/TS 15149-1: 2006. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la distribución granulométrica. Parte 1: Método del tamiz oscilante con apertura de malla igual o superior a 3,15 mm. CEN/TS 15149-2: 2006. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la distribución granulométrica. Parte 2: Método del tamiz vibratorio con apertura de malla igual o inferior a 3,15 mm. -

Contenido en cenizas: masa de residuo inorgánico que queda después de la combustión de un combustible bajo condiciones especificadas, expresada como un porcentaje de la masa de la materia seca en el combustible.

Normativa: CEN/TS 14775: 2004. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de cenizas.

Composición elemental: los porcentajes de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) se obtienen analizando los gases de combustión al quemar una muestra de la biomasa a temperatura variable. El porcentaje de oxígeno (O) se determina por diferencia a 100 de la suma de los cuatro elementos y las cenizas. La biomasa se caracteriza, en general, por poseer un bajo contenido en carbono (< 50%) y un alto contenido en oxígeno (< 40%) así como por su bajo contenido en azufre y cenizas. Estos factores son favorables para su aprovechamiento energético. -

Normativa: Según Especificación Técnica CEN/TS 14588:2003. CEN/TS 15104. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. -

Poder calorífico: es la cantidad de energía liberada por kg de combustible durante el proceso de combustión. -

Normativa: CEN/TS 14918: 2005. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del poder calorífico. -

Contenido de volátiles: pérdida en peso al calentar la muestra en atmósfera inerte, expresada como un porcentaje de la masa de la materia seca en el combustible. -

Normativa: CEN/TS 15148: 2005. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido de materiales volátiles. -

Cultivos leñosos: se trata de árboles y arbustos, tanto de secano como de regadío. Entre todos ellos se encuentran el chopo, sauce, paulownia, eucalipto, robinia y olmo de Siberia. -

La rotación del cultivo es definida como el periodo de tiempo entre dos cortas sucesivas. Este parámetro se fija en función de la máxima producción, teniendo en cuenta que en el crecimiento de los árboles llega un momento en que se pierde intensidad. Si este periodo es demasiado corto, la capacidad de rebrote se agota. -

Cultivos herbáceos: son plantas de tallo no leñoso, que mueren al final de su temporada de crecimiento, por lo que se cortan cada año. Algunos cultivos herbáceos con aprovechamiento como biomasa sólida son: la *Brassica Carinata*, el cardo (*Cynara Cardunculus*), el Miscanto y el sorgo (*Sorgum*).

Índice de Regionalización: rendimiento productivo medio asignado a los cereales en una comarca agraria para el pago de las ayudas de la PAC. -

Riego por aspersión: sistema de riego que canaliza el agua a través de tuberías con presión y la distribuye con aspersores. -

Riego por gravedad: sistema de riego en el que el agua llega a las parcelas agrícolas a través de canales sin presión e inunda progresivamente la parcela a regar.

Índice de sitio (SI): es un indicador numérico que refleja la calidad de la estación forestal en la que vegetan los árboles en cuestión. -

La calidad de estación es la mayor o menor aptitud de un lugar forestal (sitio) para la producción de biomasa vegetal, y es función de la climatología general, de la naturaleza edáfica del sustrato, de la propia fisiografía y, en menor medida, de la biocenosis. -

El índice de sitio o calidad de estación se puede estimar por la biodiversidad, por factores edafo-climatológicos y/o por variables dasométricas independientes de la densidad del arbolado, y, entre éstos últimos, uno de los que mejor y más fácilmente reflejan la calidad de la estación es la altura dominante, que se denota por H_o . -

H_o : la altura dominante es la altura media de los árboles del estrato dominante (los más altos y/o gruesos del rodal, normalmente se suele utilizar la altura dominante de acuerdo con el criterio de Assmann, correspondiente a los 100 árboles más gruesos de una hectárea) y se toma como índice de sitio o estimador de la calidad de estación porque es sensible a la mayor o menor calidad de la estación (a mayor calidad, mayor H_o) y porque es sensiblemente invariable a la silvicultura que se practique en el rodal (se podría tomar la altura media, que también es sensible a la calidad de estación, pero sí se ve influida por la silvicultura: cuando se hace una clara, normalmente la altura media aumenta, no así la dominante). -



Bibliografía y referencias

- 1- AEBIOM “European Biomass Statistics 2007”
- 2- http://www.soriactiva.com/cultivos_energeticos/index.html#siete
- 3- <http://www.salix.se/>
<http://www.alasiafranco.it/>
- 4- www.oncultivos.es
- 5- Bravo, F.; Grau, J.M.; González Antoñanzas, F. 1995. Curvas de calidad y tablas de producción para *Populus x euroamericana* en la cuenca del Duero. Montes, Revista de ámbito forestal, número 44. Asociación y Colegio de Ingenieros de Montes. Madrid.
- 6- Madrigal, A.; Herranz, J.; López, M.; Mosquera, R. 1977. Tablas de producción de *Eucalyptus globulus Labill*, en el sudoeste de España. Dirección General de la Producción Agraria, Ministerio de Agricultura. Madrid.
- 7- Fernández López, A. 1982. Evaluación del crecimiento y productividad del monte bajo de *Eucalyptus globulus* en rotaciones sucesivas. Premio de la Excelentísima Diputación de Pontevedra.
- 8- Fernández López, A. 1985. Efecto del espaciamento inicial en la producción de *Eucalyptus globulus*. Departamento forestal de Lourizán. Pontevedra.
- 9- CNR–Ivalsa, Sesto Fiorentino(Fi), Italia, Raffael Spinelli.

- ¹⁰ <http://ffii1.etsii.upm.es/renovalia/ponencias/CULTIVOS%20ENERGETICOS-CIEMAT.pdf>
<http://www.itga.com/biocombustibles/Sesion%201%20Ponencia%202%20Alberto.pdf>
<http://www.itga.com/biocombustibles/Sesion%202%20Ponencia%204%20Joaquin%20A.pdf>
<http://bioenergy.ornl.gov/reports/miscanthus/toc.html>
- ¹¹ - www.cismadeira.es/Galego/downloads/biomasa1.pdf
- ¹² - Tolosana, E., Y. Ambrosio, R. Laina, R. Martínez-Ferrari y F. Pinillos: “Rendimientos y costes de diferentes aprovechamientos de la biomasa forestal: Las experiencias en curso en Castilla y León”. Ponencia en el seminario “Oportunidades y Amenazas para la Biomasa: Experiencia en el sector del tablero”, organizado por ANFTA en el Ministerio de Medio Ambiente (Madrid), el 4 de junio de 2007.
- ¹³ - Fuente IDAE. Datos sobre la experiencia Ferálava.
- ¹⁴ - www.enersilva.org
- ¹⁵ - http://ayto-Cartaya.com/segunda_modernizacion/images/2modernizacion/archivos/Anexo4.pdf
- ¹⁶ - SODEAN. 2000. Estudio del análisis de Potencial y coste de las podas de olivar en la provincia de Jaén.

IDA Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8 - 28004 Madrid
Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14
comunicacion@ida.es
www.ida.es



P.V.P.: 5 € (IVA incluido)