

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/278022923>

Hacia una mejor gestión de los montes a través de la ordenación forestal enfocada a la obtención de biomasa y prevención de incendios (el caso del Macizo de Caroig)

BOOK · JANUARY 2014

DOWNLOADS

14

VIEWS

33

16 AUTHORS, INCLUDING:



[Eduardo Tolosana Esteban](#)

Universidad Politécnica de Madrid

54 PUBLICATIONS 32 CITATIONS

SEE PROFILE



[Rosa Planelles](#)

Universidad Politécnica de Madrid

21 PUBLICATIONS 302 CITATIONS

SEE PROFILE



[Jose Antonio Soriano](#)

University of Castilla-La Mancha

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

SEE PROFILE

Hacia una mejor gestión de los montes

A través de la ordenación forestal
enfocada a la obtención
de biomasa y prevención
de incendios

(El caso de los montes del Macizo de Caroig)



Hacia una mejor gestión de los montes

A través de la ordenación forestal
enfocada a la obtención
de biomasa y prevención
de incendios





(El caso de los montes del Macizo de Caroig)



Estudio y metodología desarrollados por IBERDROLA RENOVABLES dentro del proyecto Life + “Bioenergy & Fire Prevention”, proyecto que ha contado como socios para el desarrollo de otras actividades:

	AMUFOR: Asociación de Municipios Forestales
	Ayuntamiento de Enguera
	Ayuntamiento de Moixent
	AVEBIOM: Asociación para la Valoración Española de la Biomasa
	Eléctricas La Enguerina
	Iberdrola Renovables

En el presente estudio, Iberdrola Renovables, que ha actuado como desarrollador e integrador, ha contado con la participación de entidades especialistas de reconocido prestigio en el sector de la biomasa.

	Centro de Investigaciones Forestales (CIFOR) perteneciente al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales perteneciente a la Universidad de Castilla-La Mancha
	Deusto Business School - Universidad de Deusto

AUTORES

Jose Antonio Arrieta Calleja. Área de Bioenergía, Iberdrola Renovables.

Jose María Otero Vicario. Área de Bioenergía, Iberdrola Renovables.

Eduardo Tolosana Esteban. Laboratorio de Defensa del Monte y Aprovechamientos Forestales del Departamento de Economía y Gestión Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, de la Universidad Politécnica de Madrid.

Rosa María Planelles González. Laboratorio de Defensa del Monte y Aprovechamientos Forestales del Departamento de Economía y Gestión Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, de la Universidad Politécnica de Madrid.

Javier Madrigal Olmo. Grupo de Incendios Forestales, perteneciente al Departamento de Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales del Centro de Investigación Forestal (CIFOR) del INIA.

Carmen Hernando Lara. Grupo de Incendios Forestales, perteneciente al Departamento de Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales del Centro de Investigación Forestal (CIFOR) del INIA.

Mercedes Guijarro Guzmán. Grupo de Incendios Forestales, perteneciente al Departamento de Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales del Centro de Investigación Forestal (CIFOR) del INIA.

Juan José Hernández Adrover. Grupo de Combustibles y Motores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha.

Amparo Pazo Catalán. Grupo de Combustibles y Motores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha.

Jose Antonio Soriano. Grupo de Combustibles y Motores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha.

Esperanza Monedero. Grupo de Combustibles y Motores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha.

Miguel Ángel Larrinaga Ojanguren. Deusto Business School - Universidad de Deusto.

Marisol Basabe. Deusto Business School - Universidad de Deusto.

Íñigo Calvo Sotomayor. Deusto Business School - Universidad de Deusto.

Irma Fernández Migueláñez. Máster TIG. Facultad de Geografía. Universidad Complutense de Madrid.

Daniel J. Vega. Dr. Ingeniero de Montes.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Objetivos	17
2. METODOLOGÍA	22
2.1 Metodología para la creación de nuevos criterios de gestión forestal	22
2.2 Metodología para la evaluación de la eficacia preventiva de los nuevos métodos de gestión	23
2.2.1 Variables implicadas en el comportamiento del fuego	23
2.2.2 Comportamiento del fuego: modelos de simulación	26
2.2.3 Los simuladores FARSITE y FLAMMAP	26
2.3 Opinión de los agentes implicados en el sector	27
3. NUEVOS CRITERIOS DE GESTIÓN DE LAS MASAS FORESTALES PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	32
3.1 Localización	32
3.2 Resumen de datos de inventario	34
3.3 Propuesta de tratamientos selvícolas	35
3.3.1 Regenerado o monte bravo post-incendio	35
3.3.2 Masas de edad madura y estructura regular o casi: cortas de regeneración	38
3.3.2.1. <i>Las masas maduras de entre 100 y 500 pies/ha.</i>	39
3.3.2.2. <i>Las masas maduras de entre 500 y 1.000 pies/ha.</i>	41
3.3.2.3. <i>Las masas maduras con más de 1000 pies/ha.</i>	43
3.3.3 Masas de edad inmadura y estructura regular o casi: posibles cortas de mejora	43
3.3.3.1. <i>Cortas de mejora con el criterio del índice de Hart-Becking</i>	44
3.3.3.2. <i>Cortas de mejora con el criterio del índice de Densidad de Reineke.</i>	45
3.3.4 Montes particulares con estructura desregularizada	49

3.4 Resumen de aportaciones de los grupos de discusión	51
3.5 Esquema de sistemas y medios de aprovechamiento	52
3.6 Cuadro de rendimientos medios e intervalos para los diferentes sistemas y medios en los intervalos de pendiente considerados.	54
3.7 Cuadro de costes horarios de los medios de aprovechamiento de biomasa	55
3.8 Cuadro de costes y rendimientos de los tratamientos sobre el matorral, bajo arbolado o en superficies no arboladas.	56
3.9 Cuadro de superficies arboladas a tratar y posibilidades para uso energético en función de uso exclusivo o mixto.	58
3.10 Cuadro de costes unitarios medios e intervalos para las diferentes alternativas de tratamiento, pendiente y uso, incluyendo y sin incluir tratamientos sobre el matorral	59
3.11 Cuadro de posibilidades por intervalos de costes unitarios, con o sin tratamiento del matorral y con o sin aprovechamiento mixto con madera.	61
3.12 Resumen de los resultados obtenidos	63
4. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA FORESTAL	68
4.1 Modelos de combustible en la zona de estudio	69
4.1.1 Localización	69
4.1.2 Régimen de incendios	70
4.1.3 Plan de prevención de incendios	71
4.2 Simulaciones de grandes incendios con FARSITE y FLAMMAP	72
4.2.1 Generación de puntos de inicio de incendios	72
4.2.2 Fuentes de datos, información geográfica y variables consideradas	73
4.2.2.1 Datos de entrada (inputs)	74
4.2.2.2 Ajustes	82
4.2.2.3 Datos de salida (outputs)	83
4.2.3 Descripción de escenarios de gestión	85
4.2.4 Análisis estadístico	87

4.3 Análisis de áreas cortafuegos y lógica fuzzy	87
4.3.1 Planteamiento y justificación	87
4.3.2 Análisis fuzzy y optimizador FLAMMAP	88
4.3.3 Análisis estadístico	89
4.4. Resultados	90
4.4.1 Análisis de la eficacia preventiva de escenarios selvícolas y de gestión de combustible para la obtención de biomasa	90
4.4.2 Análisis de la red de cortafuegos mediante lógica fuzzy y optimizador FLAMMAP	96
4.4.3 Interpretación de los resultados	99
5. EVALUACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA INSTALABLE	104
5.1 Hipótesis de trabajo	104
5.2 Resultados	104
5.3 Variabilidad de los resultados en función de las hipótesis de trabajo	105
5.3.1 Variabilidad de los resultados en función de las toneladas año disponibles	105
5.3.2 Variabilidad de los resultados en función del valor del PCI considerado	105
5.3.3 Variabilidad de los resultados en función del valor de la humedad considerado	106
5.4 Interpretación de los resultados	107
5.5. Otras biomásas complementarias	107
6. ALMACENAMIENTO DE BIOMASA	110
6.1. Almacenamiento de biomasa forestal astillada	110
6.1.1 Evolución de la temperatura	110
6.1.1.1 <i>Altura de la pila</i>	111
6.1.1.2 <i>Tamaño de partícula</i>	112
6.1.1.3 <i>Distribución de temperaturas en el interior de la pila</i>	113
6.1.1.4 <i>Control de la autocombustión</i>	114
6.1.2 Evolución de la humedad	114

6.1.2.1 <i>Altura de la pila</i>	115
6.1.2.2 <i>Tamaño de partícula</i>	119
6.1.3 Pérdidas de materia seca	120
6.1.4 Descomposición fúngica y microbiana	122
6.1.5 Descomposición química	123
6.2 Recomendaciones	123
Referencias	125
7. CREACIÓN DE RIQUEZA Y CONTRIBUCIÓN SOCIO-MEDIOAMBIENTAL	132
7.1 Estructura de la Herramienta Desarrollada	132
7.1.1 Cálculo de Creación de Riqueza, Mantenimiento de Empleo y Retornos para la Hacienda Pública	132
7.1.2 Análisis de la Aportación Social y Medioambiental	132
7.2 Metodología Aplicada	133
7.2.1 Metodología para el Cálculo de Creación de Riqueza, Mantenimiento de Empleo y Retornos para la Hacienda Pública	133
7.2.2 Metodología para el Análisis de la Aportación Social y Medioambiental	134
7.2.3 Hipótesis de trabajo y limitaciones de la metodología utilizada	135
7.3 Mapeado de la inversión en una Planta de Biomasa: Agentes, Fases y Actividades	135
7.3.1 Ciclo de vida de una Planta de Biomasa	135
7.3.2 Agentes, fases y actividades involucradas	138
7.3.2.1 <i>Ciclo de Vida de la Planta de Biomasa</i>	138
7.3.2.2 <i>Ciclo de Vida del Cultivo Energético</i>	139
7.3.2.3 <i>Sectores económicos asociados</i>	139
7.4 Herramienta desarrollada y resultados obtenidos	141
7.4.1 Herramienta desarrollada	141
7.4.2 Resultados asociados a la puesta en marcha y explotación de una Planta de Biomasa	142

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN	146
ANEXO I - RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y AGRADECIMIENTOS	150
Relación bibliográfica sobre selvicultura y gestión de masas arboladas de pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i> Miller) o sobre directrices y estimación de existencias en las áreas estudiadas	150
Relación bibliográfica sobre rendimientos medios e intervalos para los diferentes sistemas de aprovechamiento	151
Relación bibliográfica sobre referencias al almacenamiento de biomasa	152
Relación bibliográfica relativa a la evaluación de la eficacia del aprovechamiento energético de la biomasa forestal para la prevención de incendios	155
Agradecimiento	157
ANEXO II ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS Y PRUEBAS DE COMBUSTIÓN	160
1. Introducción al pelletizado	160
2. Pelletizado	160
2.1. Instalación experimental	160
2.2. Materias primas para el pelletizado	161
2.3. Metodología de ensayo	161
2.3.1 Pretratamiento	161
2.3.1.1 Secado	161
2.3.1.2 Molienda	162
2.3.1.3 Acondicionamiento	162
2.3.2 Compresión	162
2.3.3 Análisis de la calidad física del pellet	163
2.3.3.1 Durabilidad mecánica	163
2.3.3.2 Contenido en finos	164
2.3.3.3 Densidad aparente	164

2.3.3.4 <i>Densidad de partícula y dimensiones</i>	164
2.3.4. Caracterización química del pellet	165
2.3.4.1 <i>Preparación de la muestra</i>	165
2.3.4.2 <i>Procedimientos y equipos empleados</i>	165
3. Resultados	168
3.1 Resultados derivados de la Compresión	168
3.2 Resultados de calidad del pellet	169
4. Conclusiones del pelletizado	172
5. Introducción a la combustión	172
6. Combustión	173
6.1 Presentación de la planta	173
6.2 Definición de parámetros y metodología de ensayo	175
6.3 Materias primas para la combustión	176
7. Resultados	177
7.1 Emisiones y rendimiento	177
7.2 Residuo sólido generado	180
8. Conclusiones de la combustión	181
ANEXO III SECADO FORZADO DE ASTILLAS FORESTALES	184
1. Introducción	184
2. Secado forzado	185
2.1 Generalidades	185
2.2 Secado forzado	186
2.2.1 Secaderos sin aporte de calor	186
2.2.2 Secaderos directos	186

2.2.2.1	<i>Generalidades</i>	186
2.2.2.2	<i>De tambor rotativo o trommel</i>	187
2.2.2.3	<i>De transporte neumático</i>	187
2.2.2.4	<i>De túnel</i>	187
2.2.2.5	<i>De lecho fluidizado</i>	187
2.2.3	Secaderos indirectos	188
2.2.3.1	<i>Generalidades</i>	188
2.2.3.2	<i>De tambor rotatorio con haces tubulares</i>	188
2.2.3.3	<i>De bandejas</i>	188
2.2.3.4	<i>De disco</i>	188
2.2.3.5	<i>De paletas</i>	188
2.3	Parámetros a tener en cuenta al elegir el secadero	189
2.3.1	El contenido en agua de la madera	189
2.3.2	Otros factores a considerar	191
2.4	Ejemplos de secaderos de astillas existentes en el mercado	191
2.4.1	Introducción	191
2.4.2	Secaderos de tambor rotativo	191
2.4.3	Secaderos de banda	192
2.4.3.1	<i>SWISS COMBI secadero de banda tipo KUVVO</i>	192
2.4.3.2	<i>Secadero de banda de baja temperatura de la compañía STELA</i>	193
2.4.4	Secadero compacto Ökodry de la compañía FLIEGL	194
2.4.5	Secadero vertical de la compañía SAIMATEC	195
2.4.6	Secadero solar	195
3.	Conclusiones	197
REFERENCIAS		198

1

■ Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

España se sitúa en el tercer lugar de Europa en superficie forestal arbolada (18,3 millones de hectáreas en 2009), por detrás de Suecia y Finlandia y es el país de Europa con mayor incremento de superficie de bosque, con un ritmo anual del 2,19%, muy superior a la media europea (0,51 %). También es el país con mayor superficie forestal desarbolada (9,3 millones de hectáreas) donde España posee más del 40% de los matorrales y pastizales europeos, formaciones vegetales prácticamente inexistentes y por tanto singulares en muchos países europeos, lo que explica el interés de la Comisión Europea por protegerlos, (SECF, 2013).

La posibilidad anual (madera para extracción) es aproximadamente de 46 millones de metros cúbicos, siendo el volumen de cortas de 19 millones de metros cúbicos. La tasa de extracción por tanto es del 41% que contrasta con la tasa europea del 69%, (SECF, 2013). Por tanto, la posibilidad de extracción de biomasa arbórea sin perjudicar la sostenibilidad de los bosques españoles es, en principio, bastante elevada.

El problema que tienen muchas zonas mediterráneas con crecimientos bajos, fuertes pendientes (dificultad de mecanización) y escasez de mercado de madera es que estos aprovechamientos han dejado de ser rentables. La biomasa sería una alternativa comercial para los excedentes de madera en pie que tienen muchos montes actualmente sin explotación.

La Directiva 2009/28 del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables define la biomasa como:

“La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.”

Entre los beneficios de la biomasa forestal se han citado: la seguridad de suministro (debido a que como se ha mencionado existe disponibilidad del recurso), la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con otros combustibles fósiles (las emisiones de biomasa, según diferentes tecnologías y distintos estudios, son de 35 a 178 g CO₂ por kWh, frente a 607,6 para el gas, 742 para el gasóleo y 975 para el carbón, (Varun et al, en “LCA of Renewable energy for electricity generation systems - A review”, en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009): 1067-1073)), su potencial de creación de empleo y de desarrollo económico de zonas rurales (debido a que la totalidad de esta biomasa se extrae en áreas rurales en general con bajos niveles de desarrollo económico y despoblación).

España, debido a su clima con las estaciones muy marcadas, especialmente con veranos calurosos y secos, proclive a que se produzcan incendios de cierta magnitud. Además, el progresivo abandono del monte y el éxodo rural, con un abandono de los aprovechamientos tradicionales del monte (ganadería, leñas...), hace que los incendios cada vez sean más numerosos. En el año 2013, de enero a octubre se han producido en España más de 9.000 incendios que han quemado más de 53.000 hectáreas de monte.

El aprovechamiento de la biomasa forestal implicaría una disminución de la biomasa en el monte y por tanto se ha citado que tendría un impacto positivo en la disminución del peligro de incendios (Duralde et al., 2012). Como consecuencia de estas externalidades positivas para el medio ambiente, el fomento del empleo y el desarrollo rural y de la mejora de los sistemas de obtención de energía (térmica y eléctrica), la biomasa forestal se está proponiendo como una energía renovable de futuro, (APPA, 2012). Sin embargo impedimentos legales (moratoria sobre primas a la biomasa como energía renovable) y técnicos (falta de rentabilidad de aprovechamientos forestales en áreas mediterráneas de baja producción forestal) están dificultando su puesta en marcha en España.

Lo cierto es que la hipótesis de que el aprovechamiento de la biomasa forestal tendría un impacto positivo en la disminución del peligro está sin contrastar en tanto que existen dudas sobre qué intensidad deben tener los

tratamientos o si sólo la extracción de arbolado sería suficiente para prevenir incendios, al menos la disminución del peligro de incendios de copa.

Por ello, el uso de los simuladores de incendios aplicados a la evaluación de tratamientos selvícolas puede cuantificar las diferencias existentes en el comportamiento del fuego entre la masa actual y la masa después de aplicar una serie de tratamientos selvícolas.

Para la elaboración de los nuevos criterios de gestión se partía de un inventario y cartografía digital basada en la tecnología LIDAR con apoyo en parcelas de muestreo en campo realizado dentro del proyecto sobre los montes públicos de los términos municipales de Enguera y Moixent. También se contaba con información sobre infraestructuras de incendios y mapas de modelos de combustibles de la Comunidad Valenciana.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es la definición de nuevos criterios de gestión de las masas forestales encaminados a la obtención de biomasa como fuente de energía renovable que permita actuar para paliar los efectos del cambio climático, evaluar la eficacia de los mismos para la prevención de los incendios forestales y analizar el impulso en el desarrollo rural a través de la creación de riqueza y empleo que todas estas medidas puedan tener.

Todos estos nuevos criterios y actuaciones recogidos en el estudio están en línea con las directrices marcadas desde la Comunidad Europea (CE) y en concreto, con el "Action Plan on Biomass" (COM 2005) y con el "EU Forest Action Plan" (COM 2006), donde ambas directivas promocionan el uso de la biomasa para la generación energética como una forma de mitigar el cambio climático por sustitución de combustibles fósiles, de mejorar la independencia energética y de generar riqueza a través de la creación de trabajo y oportunidades en las áreas rurales.

Como objetivos secundarios cabe citar:

- Propuesta de definición de actuaciones selvícolas y de organización temporal (de gestión) para las masas arbóreas inventariadas en los términos de Enguera-Moixent. Cuantificación (a partir de la propuesta anterior y de los datos de inventario) de las superficies de posible intervención durante la aplicación del plan de gestión (15 años) y estimación de la correspondiente posibilidad (toneladas por año) en biomasa para uso energético o mixto - energético y maderable -.
- Definición de los sistemas de aprovechamiento de biomasa para materializar las actuaciones selvícolas en cada estrato, previa definición de estos estratos teniendo en cuenta las condiciones de masa (dasométricas) y la fisiografía (básicamente las pendientes).
- Evaluación de costes unitarios (por tonelada a humedad de consumo del 30%) de las diferentes actuaciones (coste medio y rango normal de costes para cada tipo de actuación y cada estrato). Evaluación del sobre coste que supondría añadir el desbroce, a hecho o selectivo, a los tratamientos propuestos
- Evaluación de costes de tratamientos preventivos sobre el matorral o regenerado, a efectos informativos y por su trascendencia en prevención de incendios (porque en principio el área no arbolada no era la zona objetivo para producción de biomasa).
- Cuantificación de la posibilidad en biomasa para uso energético por intervalos de costes, incluyendo costes indirectos y beneficios de las empresas de aprovechamiento, tanto para el caso de no tratar el matorral bajo arbolado como para el caso de tratarlo.
- Simular el comportamiento del fuego en la masa forestal estudiada y comprobar la efectividad de los diferentes tratamientos selvícolas sobre la masa arbolada y sobre los combustibles para reducir el potencial de comportamiento del fuego.

- Evaluar los resultados de las simulaciones de incendios en diferentes escenarios de simulación libre para valorar el efecto del tipo de gestión sobre la superficie afectada o intensidad del fuego.
- Utilizar la lógica difusa en la planificación de la red de áreas cortafuegos para proponer mejoras en el diseño de estas infraestructuras y optimización de los tratamientos selvícolas de apertura y mantenimiento.
- Cuantificar y comparar estadísticamente la eficacia para la prevención de incendios de los escenarios evaluados de extracción de biomasa.
- Proponer elementos para la toma de decisión en la gestión de estas masas que compatibilicen el aprovechamiento de biomasa con fines energéticos y la prevención de incendios.
- Evaluar la validez de FARSITE y FLAMMAP en las condiciones españolas para simular incendios en diferentes escenarios de gestión de biomasa forestal.
- Explorar herramientas geoestadísticas para mejora de la información LIDAR, utilizar Model Builder de ArcGIS 10 para la automatización de diferentes procesos analíticos.
- Emplear la lógica difusa para modelar las redes cortafuegos en función de los modelos de combustible y pendiente del terreno. Esta es una técnica que se considera novedosa en el ámbito forestal en general y según los antecedentes consultados nunca se ha explorado para el diseño de áreas cortafuegos.
- Estudiar la potencia eléctrica instalable con la biomasa forestal disponible de una posible central termoeléctrica de biomasa en la zona la zona
- Definir la mejor forma de almacenamiento de la biomasa, tratándose ésta de un material vivo y teniendo que ser almacenada durante largos periodos de tiempo.
- Calcular la creación de riqueza de una central termoeléctrica de biomasa, estudiando la riqueza económica, los retornos fiscales, el empleo mantenido, los retornos a la hacienda pública. También se medirán variables sociales y medioambientales, como las emisiones contaminantes evitadas al año, las toneladas equivalentes de petróleo ahorradas, el efecto depurativo equivalente, etc.

2

■ Metodología

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada ha tenido en cuenta tanto criterios técnicos selvícolas como criterios de estudio del comportamiento del fuego.

2.1 METODOLOGÍA PARA LA CREACIÓN DE NUEVOS CRITERIOS DE GESTIÓN FORESTAL

La metodología utilizada para la definición de la ordenación selvícola y el estudio del aprovechamiento de la biomasa fue la siguiente:

- **Revisión bibliográfica:** se realizó una revisión bibliográfica, además de recabar información específica a la Administración Forestal, organismos de investigación y empresas del área que presenta una problemática similar a la de estudio en relación con la gestión de las masas de pino carrasco, sobre las normas selvícolas y modelos de gestión aplicables.
- **Análisis de los datos del inventario.** Se analizaron los datos del inventario llevado a cabo en el proyecto sobre las masas arbóreas de los montes objeto de estudio, recabándose más información sobre las superficies de matorral, cultivos y, especialmente, regenerados y montes bravos post incendio. Sobre esos datos inventariales, se analizó la superficie necesitada de tratamiento selvícola, empleando los criterios definidos por la comunidad científico – técnica, tratando de aplicar los principios de gestión recogidos en el documento valenciano de planificación forestal (PATFOR, 2013), y se evaluó la producción de cada tipo de intervención en función de la densidad de las masas y del porcentaje estimado de eficiencia en la recogida.
- **Propuesta de línea base selvícola:** Las propuestas de tratamiento sobre las masas arboladas se recogieron de forma analítica y gráfica, incluyendo las producciones estimadas de biomasa, en una propuesta de línea base selvícola para ser discutida por los principales grupos de sectores interesados en la gestión y la prevención de incendios en el área de estudio.
- **Criterios de definición de los sistemas de aprovechamiento en función del tipo y tamaño de los árboles y de las condiciones fisiográficas:** Después de terminar de perfilar la propuesta de línea base selvícola, se estudiaron las formas de ejecución de los tratamientos y los medios para el aprovechamiento. Los principales factores considerados fueron el tamaño de los árboles (monte bravo – latizal o fustal bajo y fustal alto) y la pendiente como principal factor fisiográfico, decidiéndose que no se intervendría en pendientes que superasen el 40%, y que se haría de forma distinta y con diferentes medios en masas con pendiente inferior al 25% y comprendida entre el 25 y el 40%. Se decidió contemplar dos posibilidades en los tratamientos sobre árboles de mayor tamaño (cortas de regeneración), a saber, el aprovechamiento integral de la biomasa aérea para uso energético y el aprovechamiento de los fustes como madera sólida, dejando ramas y copas, en ese caso, para uso energético. No se pudieron considerar mas factores de una forma detallada – por ejemplo, las distancias de desembosque o los medios disponibles por las empresas de la comarca – por falta de datos, aunque se procuró adoptar valores medios y no emplear de modo generalizado maquinaria que no estuviera presente, proponiendo una utilización parcial y una implantación progresiva, por ejemplo, de medios mecanizados.
- **Criterios de definición de los tratamientos sobre el matorral.** Los posibles tratamientos sobre el matorral se evaluaron a partir de datos de empresas y administraciones valencianas. Se asignaron rangos de costes tanto a los desbroces extensivos sobre superficies no arboladas como a los desbroces extensivos y puntuales que podrían acompañar a los tratamientos selvícolas sobre masas arboladas con pies de mayor tamaño (claras y cortas de regeneración). Se definieron también los tratamientos sobre la vegetación en las infraestructuras lineales de defensa contra incendios, si bien se ha procurado llevar a cabo una evaluación económica de sus rangos y valores medios de costes. También en este caso se ha encontrado una información limitada sobre factores muy relevantes (fracción de cabida cubierta, altura del matorral, etc.), por lo que estas estimaciones se deben considerar aproximadas.

- **Fuentes y criterios de asignación de rendimientos medios:** Para asignar rendimientos medios a los distintos sistemas de aprovechamiento de biomasa, se han analizado las operaciones en función de los factores indicados (tamaño de los árboles, densidad de las masas y pendiente), empleándose referencias a experiencias concretas en la Comunidad Valenciana siempre que han estado disponibles. En otro caso, se han utilizado referencias a otras experiencias de campo en otras regiones, afectando a los valores de coeficientes de corrección en función del peso de la extracción de biomasa, el tamaño medio de los pies, la pendiente, etc. Este procedimiento basado en referencias puntuales, habida cuenta de la heterogeneidad del medio forestal, tiene evidentes limitaciones, por lo que las estimaciones se deben también considerar aproximadas, y se han suministrado preferentemente en forma de rangos de valor, aunque finalmente se haya empleado el valor medio en los cálculos siguientes.
- **Metodología de estimación de costes horarios.** Se han utilizado métodos clásicos a partir de datos de precios y consumos propios de Iberdrola Renovables y de la UPM en experiencias reales de aprovechamiento de biomasa.
- **Derivación de costes unitarios estimados.** Los costes unitarios se han valorado, para cada tipo de intervención, como cociente entre el coste horario de los medios empleados en cada operación y los rendimientos estimados para la misma. Los costes unitarios directos se han obtenido como suma de los costes unitarios de las distintas operaciones, incluido el astillado o triturado de la biomasa en cargadero, excepto en el caso del transporte, en que se han empleado rangos de costes unitarios: entre 0 y 4 €/t para el transporte intermedio, y entre 5 y 10 para el transporte a fábrica, incluyendo la carga, supuestas distancias de transporte entre 25 y 75 km. La suma de estos costes directos se ha incrementado en un 14% para cubrir los costes indirectos, fijos y de estructura de las empresas implicadas, y los costes totales se han incrementado a su vez en un 10% para contemplar los beneficios de la empresa o empresas subcontratadas para llevar a cabo los aprovechamientos. Se ha contemplado también el posible efecto de la realización de desbroces simultáneos a los tratamientos, para lo que se ha dividido su coste medio por hectárea entre la producción de biomasa considerada.
- **Definición de intervalos de costes.** Para clasificar las superficies a tratar y los pesos de biomasa potencial en función de sus costes, se han recabado informaciones de mercado, y se ha decidido definir un primer intervalo de costes competitivos menores de 50 €/t de astilla al 30% de humedad en base húmeda y puesta en parque de planta (menor de 48€ para el caso del material triturado, en principio de menor calidad como combustible por su granulometría y la posible presencia de impurezas). Se han definido intervalos para el resto de operaciones más costosas, de 51-75 €/t de astilla (49-70 para el material triturado), 76-100 €/t de astilla (71-90 para el material triturado) y más de 100 €/t de astilla (90 para el material triturado). Con estos criterios se ha clasificado la producción total, teniendo en cuenta dos posibles variables, la posibilidad de emplear los fustes de las cortas de regeneración como madera sólida o también para uso energético, y la inclusión o no de tratamientos de desbroce en los costes de obtención de la biomasa.

2.2 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICACIA PREVENTIVA DE LOS NUEVOS MÉTODOS DE GESTIÓN

2.2.1 Variables implicadas en el comportamiento del fuego

La evolución de un incendio forestal está regida por el denominado triángulo del fuego, condicionado por tres factores, que son los que determinarán las características del mismo: combustibles, topografía y meteorología.

Los combustibles determinan la facilidad de ignición y también la combustibilidad, es decir, la propagación del fuego dentro de una estructura vegetal compuesta por una serie de modelos estructurales de combustible.

La meteorología (radiación solar, precipitación, temperatura, humedad relativa, viento) afecta, en primer término, a la desecación del combustible lo que repercute en su ignición y, posteriormente, en el balance de energía transmitido por el incendio.

La topografía (elevación, pendiente y orientación) afecta a los dos factores anteriores, al combustible afectando a su cantidad y distribución y por tanto a su continuidad horizontal y vertical; y a la meteorología, alterando sus condiciones, modificando corrientes de aire, apantallando y reflejando la energía y canalizando la propagación del incendio.

El Laboratorio de Incendios Forestales del Servicio Forestal Americano (NFFL), estableció (Anderson, 1982) cuatro grandes grupos de modelos de combustible según el tipo de vegetación que domina la propagación del fuego: pasto, matorral, hojarasca bajo arbolado y restos de operaciones selvícolas. Éstos se subdividen en función de la altura y la carga de combustible, en 13 modelos.

Posteriormente, Scott y Burgan (2005) establecieron siete grandes grupos: pasto (GR); pasto-matorral (GS); matorral (SH); hojarasca, pastizal y/o matorral bajo arbolado (TU); hojarasca y restos bajo arbolado (TL); abundantes restos bajo arbolado (SB); y zonas no combustibles (NB). A su vez, estos siete grandes grupos se subdividen hasta un total de 45 modelos distintos, (Scott y Burgan, 2005).

En España la mayoría de las Comunidades Autónomas han adoptado los 13 modelos clásicos del sistema americano para describir los combustibles, con las convenientes adaptaciones a los ecosistemas mediterráneos, (Vélez, 2009). Siguiendo la metodología de Scott y Burgan, el Consorcio de Bomberos de Valencia y la Unidad de Brigadas de Emergencia han propuesto una nueva clasificación de modelos de combustible para la provincia de Valencia, (Quílez y Chinchilla, 2013). Esta adaptación es debida a una gran diversidad de estructuras de matorral, y a la inclusión del concepto de modelos de pasto de terrenos rurales abandonados por la agricultura (Tabla 1).

	Modelos Consorcio de Bomberos	Modelos Scott y Burgan 2005
Pastizal	1.- P1 Pasto $\leq 0,5$ m	GR 2(102) Baja carga de hierba en clima seco (Dinámico)
	2.- P2 Pasto $\geq 0,5$ m y $\leq 1,5$ m	GR 4(107) Carga moderada de hierba en clima seco (Dinámico). La altura se sitúa en torno a 70 cm
	3.- P3 Pasto $\geq 1,5$ m	GR 7(109) Carga muy alta carga de hierba en clima húmedo (Dinámico). La altura se sitúa en torno a 1 m
Pastizal-matorral	4.- PM 1: Pasto y matorral $\leq 1,20$ m	GS 2 (122) Carga moderada de hierba y matorral en clima seco (Dinámico). El matorral tiene entre 30 cm y 1 m y la carga de hierba es moderada
	5.- PM 2: Pasto y matorral $\geq 1,20$ m	GS 4 (124) Alta carga de hierba y matorral en clima húmedo (Dinámico). La altura del combustible es superior a 60 cm
Matorral	6.- M1 Matorral $\leq 0,30$ m	SH 2 (142) Carga moderada de matorral en clima seco. La altura del matorral es de 30 cm
	7.- M2 Matorral $\geq 0,30$ m y $\leq 1,20$ m	Interpolar entre SH 2 y SH 5
	8.- M3 Matorral $\geq 1,20$ m	SH 5 (145) Carga alta de matorral en clima seco. La altura del matorral está entre 1,2 y 2 m. (SH 7 Carga muy alta)
Matorral bajo arbolado	9.- MA1 Matorral con regeneración de arbolado	TU 4 (164) Coníferas pequeñas con restos. La propagación principal es por la hojarasca con pasto presente y pies pequeños de pinos
	10.- MA2 Matorral $\leq 1,20$ m bajo arbolado adulto	Interpolar entre TU 1 (161) Baja carga de combustible de madera, pasto y matorral en clima seco bajo dosel arbóreo y TU 5 (165) Carga muy alta de madera y matorral en clima seco bajo dosel arbóreo
	11.- MA3 Matorral $\geq 1,20$ m bajo arbolado adulto	TU 5 (165) Carga muy alta de madera y matorral en clima seco bajo dosel arbóreo
	12.- MA4 Restos leñosos junto con arbolado adulto	TL 5 (185) Carga elevada de coníferas caídas
Hojarasca bajo arbolado	13.- HA Hojarasca bajo arbolado	TL 1 (181) Pequeña carga de ramillas de coníferas. El fuego es propagado por la hojarasca presente, situándose la profundidad del combustible entre 2,5 y 5 cm. Modelo de <i>Pinus pinaster</i> TL 8 (188) Mantillo de acículas largas

Tabla 1. Descripción de los modelos de combustible definidos para la provincia de Valencia por el Consorcio de Bomberos y su equivalencia con los modelos de Scott y Burgan, (Quílez y Chinchilla, 2013).

2.2.2 Comportamiento del fuego: modelos de simulación

El comportamiento del fuego se puede predecir en base a modelos que pueden ser (Guijarro, 2003):

1. **De tipo empírico**, basados en datos analizados mediante la herramienta estadística con información recogida en incendios y quemas experimentales.
2. **De tipo físico**, basados en los procesos de transmisión de calor y el balance energético. Actualmente existen diversos modelos físicos para simular incendios forestales. Uno de los más avanzados es el modelo físico FIRETEC.
3. **Modelos mixtos físico-matemáticos o semi-empíricos** como el de Rothermel (1972), el más utilizado mundialmente. Se basan en la física de la combustión pero los parámetros y condiciones de contorno están fijadas en base a experimentos de campo y laboratorio. Este modelo se ha aplicado en diferentes desarrollos informáticos por parte del sistema forestal americano (www.fire.org) que finalmente han dado como resultado el paso a simuladores cartográficos como el programa FARSITE (Finney, 2004).

Todos los simuladores utilizan, además del modelo del comportamiento del fuego subyacente, una técnica de simulación que representa la propagación del fuego en el terreno. Cada técnica de simulación difiere de otras en cómo representan el terreno y el proceso de propagación. El terreno puede ser visto como una malla de celdas discretas, donde la propagación del fuego de una celda a otra está gobernada por un conjunto específico de reglas o por probabilidad de ocurrencia. Otra forma, es modelizar la línea de fuego por funciones matemáticas sobre un terreno visto como un medio continuo. La utilizada en el modelo FARSITE es la **propagación elíptica**. Esta técnica proyecta el terreno como un medio continuo, considerando la propiedad de que bajo condiciones uniformes el crecimiento del fuego en dos dimensiones es elíptico, entonces, esta aproximación implementa el crecimiento del fuego utilizando las propiedades de comportamiento del fuego junto a las propiedades matemáticas de las elipses (Figura 1).

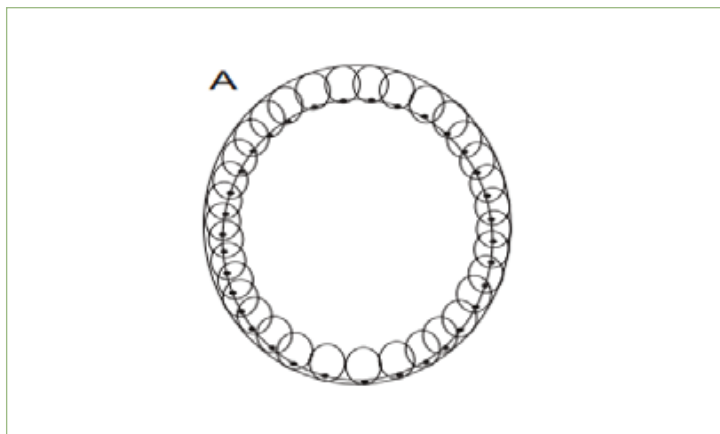


Figura 1. Propagación elíptica según el principio de Huygens usada por FARSITE.

2.2.3 Los simuladores FARSITE y FLAMMAP

El objetivo de FARSITE y FLAMMAP es simular el desarrollo y el comportamiento de fuegos bajo condiciones variables del terreno, combustibles y meteorológicas. También es un modelo determinístico pues se pueden relacionar los resultados directamente con los datos de entrada. Incorpora los modelos existentes para fuegos de superficie, fuegos de copas a través de las ecuaciones de Van Wagner (1977, 1983), saltos de fuego y aceleración del fuego en un modelo bidimensional de crecimiento del fuego. El frente de llama se modeliza por medio del principio de propagación de ondas de Huygens mediante datos SIG introducidos en el programa, tales como elevación, pendiente, orientación, tipos de combustibles y cubierta.

La principal ventaja de este sistema es la utilización en proyecciones a largo plazo de incendios forestales activos en diferentes escenarios climatológicos para analizar cómo puede cambiar el crecimiento del incendio dependiendo de la meteorología existente. También puede utilizarse para examinar la efectividad de los tratamientos realizados o hacer predicciones sobre qué sucedería si se iniciase un fuego en un punto determinado bajo condiciones meteorológicas dadas.

El principal inconveniente de la utilización de FARSITE es que requiere temas de datos SIG organizados y aporte detallado y explícito de meteorología y viento para cada escenario que se pretenda simular antes de realizar la simulación, por lo que no es posible esperar a tener información del incendio antes de tener organizados y creados los temas SIG, (<http://www.firemodels.org/index.php/national-systems/farsite>).

Los pasos previos a una simulación están representados en el diagrama de flujo (Figura 2).

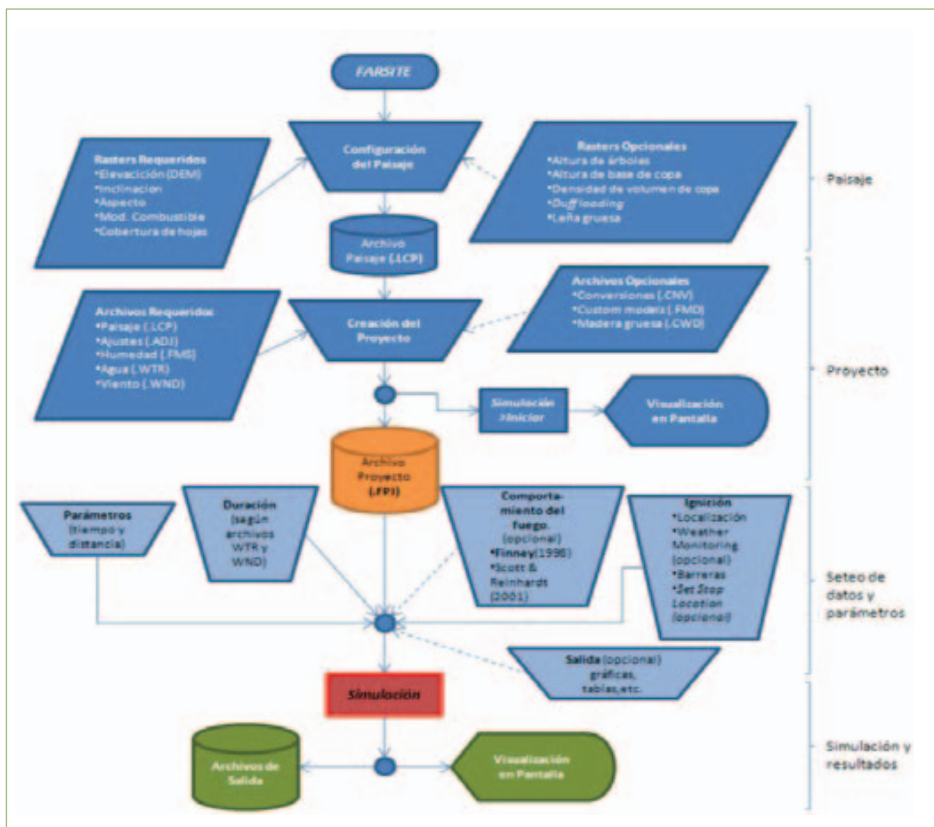


Figura 2. Diagrama de flujo de FARSITE.

El simulador FLAMMAP desarrollado también por el USDA Forest Service, es una implementación de FARSITE que incluye, entre otras opciones adicionales, un simulador de vientos locales (WINDNINJA) y un optimizador de tratamientos selvícolas para mejorar la eficacia preventiva.

2.3 OPINIÓN DE LOS AGENTES IMPLICADOS EN EL SECTOR

Debido a que desde el proyecto se ha considerado muy importante tener en cuenta la opinión de todos los agentes involucrados en el sector forestal y de prevención de incendios, durante la elaboración del presente Estudio, se sometió un primer borrador a debate.

Para ello, se dividieron a los distintos agentes por sectores de interés, haciendo tres foros distintos de debate, de tal manera que intereses cruzados de distintos sectores no implicaran que el debate sobre el documento tomara un rumbo no deseado. Además, se hicieron entrevistas personales debido a las circunstancias particulares de algunos entrevistados:

- Propietarios y gestores forestales, tanto públicos como privados. Se trata de responsables de la gestión de los montes, interesados en su buen mantenimiento y pervivencia, además de en la obtención de unas rentas lo más elevadas posibles, o al menos en la ejecución de los trabajos al mínimo coste.
- Empresas de aprovechamiento de biomasa (empresas de trabajos forestales) y usuarios finales de la misma. Se trata de empresas especializadas en la obtención de los productos forestales o realización de tratamientos, incluyendo en su caso a usuarios de estos productos. Su interés es valorar la viabilidad de la ejecución rentable de unas directrices, a los precios actuales de mercado y teniendo en cuenta también la existencia de un sector de la propiedad forestal que desea y debe ser remunerado, con el objeto final de obtener los productos al mínimo coste.
- Profesionales en la prevención y extinción de incendios forestales. Su interés es valorar la eficacia de los tratamientos propuestos en la prevención de incendios o en la mayor facilidad de su extinción, proponiendo en su caso alternativas o modificaciones en las actuaciones con fines preventivos de los incendios forestales.

Después de celebrarse estos debates, se pudo recoger la opinión de los distintos sectores interesados, en general bastante positiva en relación con la propuesta, si bien con cierto escepticismo acerca de su viabilidad económica en ciertos casos, y respecto a la relevancia de los tratamientos propuestos para el aprovechamiento de biomasa en la prevención efectiva de los incendios forestales.

3

- Nuevos criterios de gestión de las masas forestales para el aprovechamiento energético

3. NUEVOS CRITERIOS DE GESTIÓN DE LAS MASAS FORESTALES PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Los montes objeto de este estudio, tradicionalmente se han aprovechado para el uso de leñas, de madera y para pastoreo. Tal fue la intensidad de estos aprovechamientos, que a principios del siglo XX se encontraban sin vegetación arbórea.

En la actualidad nos encontramos con una situación totalmente distinta, el monte ya no se explota debido a la aparición de los combustibles fósiles, al éxodo rural y a otros mercados de madera de mayor calidad, por lo que cada vez el monte presenta una mayor cobertura.



Santuario de la Virgen de Agres. Fotografías de 1910 y 1994 (izda y dcha respectivamente)

El aumento de cobertura vegetal genera un monte con un valor medioambiental y social mucho mayor, pero también hace que el monte sea más susceptible a la aparición de incendios. El aprovechamiento de la biomasa puede ser una herramienta que permita seguir trabajando el monte de forma sostenible, y por tanto generar riqueza en el medio rural, a la vez que reduce el combustible presente en el medio, por lo que la aparición de incendios o la superficie incendiada podrían verse disminuidas.

Sin embargo, apenas existen experiencias de trabajos orientados al aprovechamiento de biomasa, y por tanto se hace necesario definir los criterios tanto selvícolas como de aprovechamientos forestales de tal forma que nos aseguren la sostenibilidad tanto medioambiental como económica a largo plazo.

3.1 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio está formada por el Macizo del Caroig (Figura 3). Se localiza en la provincia de Valencia, dentro de la Comunidad Valenciana. Se trata de una superficie de aproximadamente 126.126 hectáreas en las que se agrupan un total de 18 municipios. Las coordenadas UTM son (665068,57; 4355699,61), (687620,32; 4295207,75), (664680,90; 4354885,73) y (704101,00; 4317277,41).

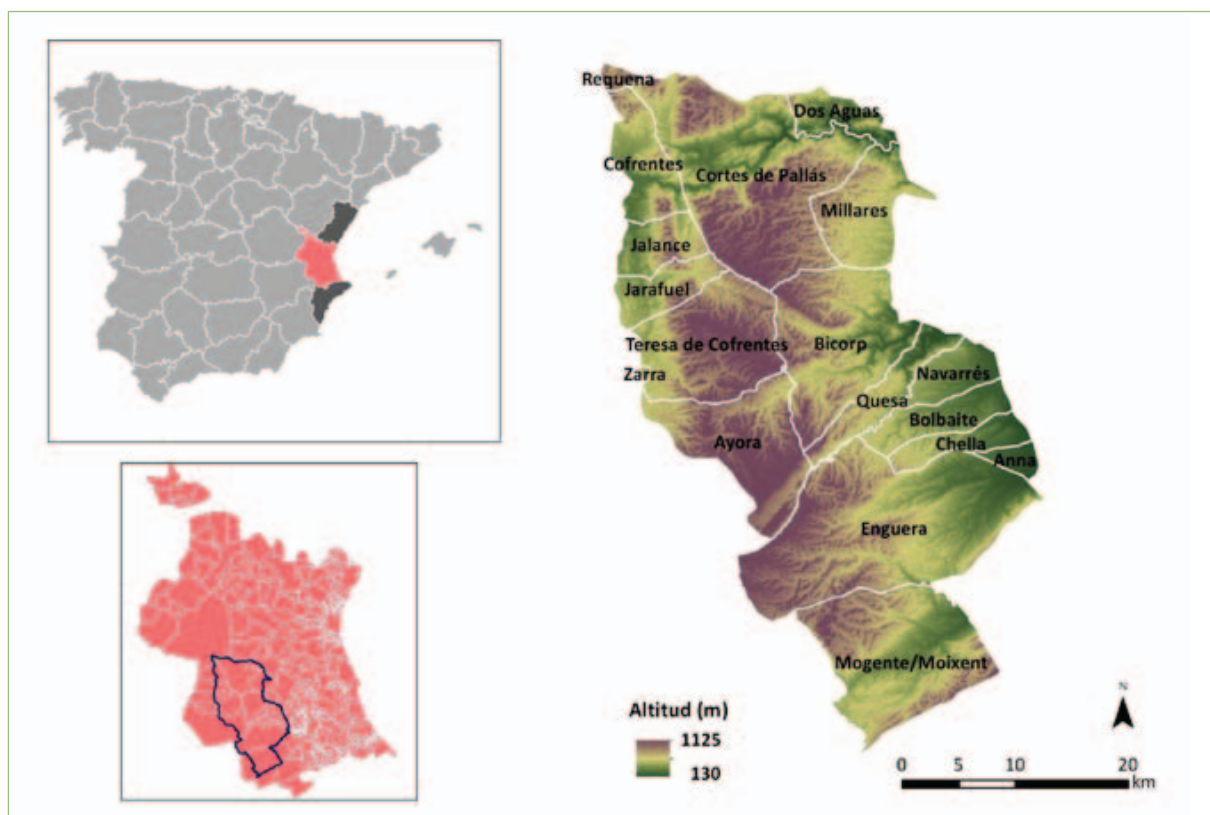


Figura 3. Situación del Macizo de Caroig.

La Tabla 2 resume los principales usos del suelo de la zona según SIOSE 2011. Solo el 2,4% de la superficie de la zona de estudio son zonas artificiales o agua. La masa forestal está compuesta principalmente por *Pinus halepensis*, encinas y restos de cultivos (olivos, almendros y algarrobos).

Descripción		Superficie (ha)	Descripción		Superficie (ha)
Arbolado forestal	Coníferas	24.770,60	Coberturas artificiales	Edificación	2,85
	Fronosas	60,04		Equipamiento, dotacional	46,90
Matorral	Matorral	41.639,29		Industrial	119,28
Pastizal	Pastizal	42.947,51		Infraestructuras	644,29
Cultivos	Cultivos herbáceos	3.806,55		Lámina de agua artificial	144,83
	Cultivos leñosos	14.125,24		Otras construcciones artificiales	12,28
Zonas naturales sin vegetación	Ramblas	567,40		Primario	50,20
	Roquedo	41,14		Suelo urbanizable no edificado	24,46
	Suelo desnudo	489,24		Suelo urbano mixto	319,77
	Zonas quemadas	64,46		Terciario	50,02
Coberturas de agua	Aguas continentales	598,38		Zona de extracción	16,93

Tabla 2. Usos del suelo de la zona de estudio según SIOSE 2011. Fuente: IDE Generalitat Valenciana, (<http://terrasit.gva.es/es>).

Gran parte del territorio forestal tiene diferentes figuras de protección (Red Natura 2000, LICs, ZEPA), en concreto 80.515,2 hectáreas pertenecen a zonas LIC (Lugares de Importancia Comunitaria son todos aquellos ecosistemas protegidos con objeto de contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres) y 86.940,8 hectáreas de zonas ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves).

3.2 RESUMEN DE DATOS DE INVENTARIO

La superficie inventariada en 2012 y 2013 de los montes de los Términos Municipales de Enguera y Moixent es de 17.898 ha, de las cuales sólo presentan arbolado con un grado de cobertura superior al 50% 4.009 ha. El resto del Macizo del Caroig, se ha estudiado mediante un inventario LIDAR que se ha interpretado empleando los resultados del citado inventario. La suma de toda la superficie forestal estudiada en el macizo tiene una extensión de 126.126 ha, de las cuales presentan arbolado con más del 50% de cobertura 7.338 ha.

Ésta limitación en la cobertura atiende a criterios selvícolas. No tiene sentido reducir la densidad del arbolado en masas con una cobertura inferior al 50%, ya que se podría disminuir la necesaria protección que el arbolado otorga a los suelos, si bien podrían caber otras actuaciones en que no se afectara el estrato arbóreo.

Se han considerado aprovechables las masas de menos del 40% de pendiente media atendiendo a criterios económicos. Masas con pendientes superiores a la considerada difícilmente son mecanizables, con el consiguiente aumento del coste de obtención del combustible. Se han definido dos intervalos de pendiente, de 0 a 25% y de 25 a 40%, a efectos de definir los sistemas óptimos de aprovechamiento en cada caso.

En la Tabla 3 se presenta los porcentajes de superficie correspondientes a los intervalos de pendiente, tamaño del arbolado y grado de cobertura obtenidos combinando la información inventarial (LIDAR) con la cartográfica digital. Se puede observar que la superficie arbolada de alta cobertura, sobre parte de la cual se concentrarán las actuaciones, supone un pequeño porcentaje de la superficie total (para pendientes hasta el 40%, totaliza un 3,63% de la superficie total).

Esto es debido a que la zona estudiada ha presentado a lo largo de los últimos años un régimen de incendios muy elevado, así como una explotación intensa para la obtención de madera y leñas.

		SUP (ha)	% de superficie total
0-25% de pendiente	Fustal de alta cobertura (50-100%)	2.489,78	1,97
	Latizal de alta cobertura (50-100%)	1.000,04	0,79
	Monte bravo de alta cobertura (50-100%)	715,58	0,57
	ARBOLADO ALTA COBERTURA P<25%	4.205,40	3,33
	Fustal de baja cobertura (0-49%)	14.906,54	11,82
	Latizal de baja cobertura (0-49%)	14.754,81	11,70
	Monte bravo de baja cobertura (0-49%)	15.888,39	12,60
	ARBOLADO BAJA COBERTURA P<25%	45.549,75	36,11
	Repoblado	13.596,77	10,78
	Sin vegetación	5.710,98	4,53
	TOTAL NO ARBOLADO P<25%	19.307,74	15,31
	TOTAL P<25%	69.062,90	54,76
25-40% de pendiente	Fustal de alta cobertura (50-100%)	534,00	0,42
	Latizal de alta cobertura (50-100%)	137,37	0,11
	Monte bravo de alta cobertura (50-100%)	80,43	0,06
	ARBOLADO ALTA COBERTURA P 25-40%	751,80	0,60
	Fustal de baja cobertura (0-49%)	6.445,43	5,11
	Latizal de baja cobertura (0-49%)	8.260,24	6,55
	Monte bravo de baja cobertura (0-49%)	4.712,62	3,74
ARBOLADO BAJA COBERTURA P 25-40%	19.418,29	15,40	

		SUP (ha)	% de superficie total
	Repoblado	98,14	0,08
	Sin vegetación	1.094,39	0,87
	TOTAL NO ARBOLADO P 25-40%	1.192,52	0,95
	TOTAL P 25-40%	21.362,61	16,94
>40% pendiente	Fustal de alta cobertura (50-100%)	2.223,64	1,76
	Latizal de alta cobertura (50-100%)	150,49	0,12
	Monte bravo de alta cobertura (50-100%)	7,01	0,01
	ARBOLADO ALTA COBERTURA P>40%	2.381,14	1,89
	Fustal de baja cobertura (0-49%)	18.177,15	14,41
	Latizal de baja cobertura (0-49%)	14.727,14	11,68
	Monte bravo de baja cobertura (0-49%)	316,20	0,25
	ARBOLADO BAJA COBERTURA p>40%	33.220,49	26,34
	Repoblado	35,50	0,03
	Sin vegetación	63,32	0,05
	TOTAL NO ARBOLADO P>40%	98,82	0,08
	TOTAL p>40%	35.700,44	28,31
	TOTAL	126.125,95	100,00

Tabla 3. Cabidas de los estratos por estado de la masa, fracción de cabida cubierta e intervalos de pendiente.

3.3 PROPUESTA DE TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS

Los tratamientos propuestos se recogen de forma esquemática en la Tabla 4. Estos tratamientos se han escogido tras analizar y estudiar la bibliografía existente sobre selvicultura del pino carrasco (recogida en el Anexo I) así como la recomendaciones dadas por el PATFOR.

Regenerado o monte bravo post-incendio	Clareo sistemático o semiselectivo para $H_0 \geq 4,0$ m		
	Parcelas de estructura "regular"	Edad madura (>50 años)	Cortas de regeneración
	Masas con $t < 50$ años	Densidad elevada ($IHB \geq 30$, $IR \geq 35\% IR_{max}$)	Claras fuertes o moderadas según calidad de estación y matorral. Posibles desbroces.
		Densidad no elevada	Esperar / posibles desbroces.

Tabla 4. Esquema de los tratamientos propuestos para los pinares de *P. halepensis* en las comarcas de Enguera y Moixent

Además, se va a considerar el caso de entresaca diamétrica, tradicional en montes particulares.

3.3.1 Regenerado o monte bravo post-incendio

En estos estratos, independientemente de la especie (que en su mayoría es pino carrasco), se propone actuar a través de muy fuertes clareos tempranos sobre las masas de más de 2.000 pies/ha, no antes de alcanzarse los 4 m de altura (por razón de costes), con el objeto de que mantengan una estructura regular pero con menor espesura. Los clareos serían semisistemáticos, con "calles" para los medios de saca cada 15 m.



Monte bravo de alta densidad

En cuanto a la caracterización dasométrica, se trata de masas con un número medio de pies que se representa en el Gráfico de la Figura 4. Se estima conveniente extraer, como media, un 75% del número de pies (contando lo extraído en forma sistemática).

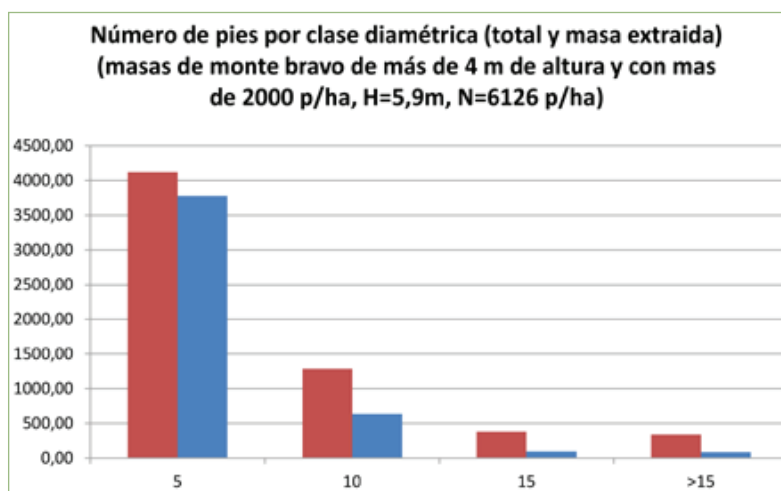


Figura 4. Distribución diamétrica inicial y masa extraída (nº pies/ha por clases diamétricas en los montes bravos densos post – incendio)

Para un diámetro medio del pie extraído de 6,8 cm, una altura de 5 m y extracción de 4.500 pies/ha, el peso unitario medio sería de 14,2 kg por pie, y el volumen de extracción, para una eficacia del 90%, sería de 55 toneladas verdes (al 45% sobre peso húmedo)/ha. Hay que tener en cuenta que el recurso en este caso es limitado (masas con origen en incendios catastróficos que hayan alcanzado un tamaño determinado) y que la biomasa resultante contendrá una muy alta proporción de acículas (peor calidad como combustible).

Se muestra un ejemplo visual de estos tratamientos propuestos en las Figuras 5 y 6.

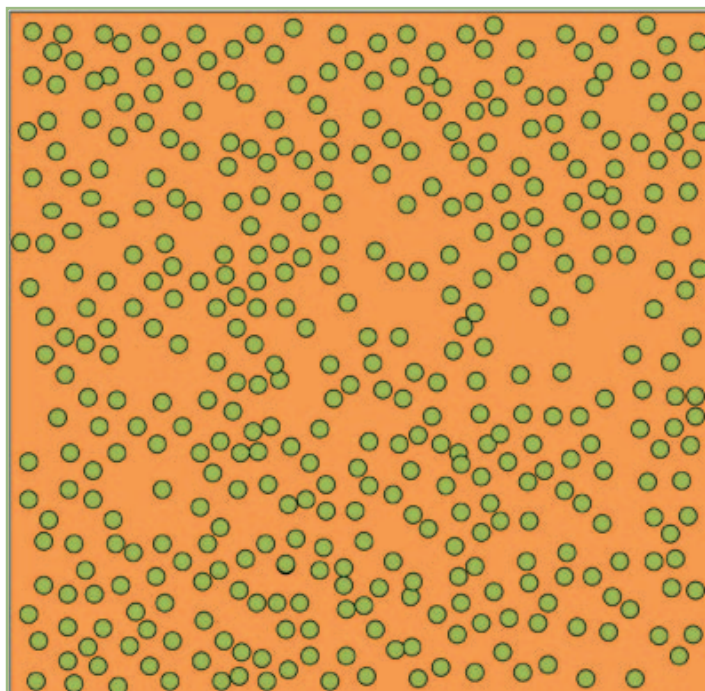


Figura 5. Masas de monte-bravo / latizal post incendio antes del tratamiento: 6.120 p/ha estimados, para altura de más de 4 metros

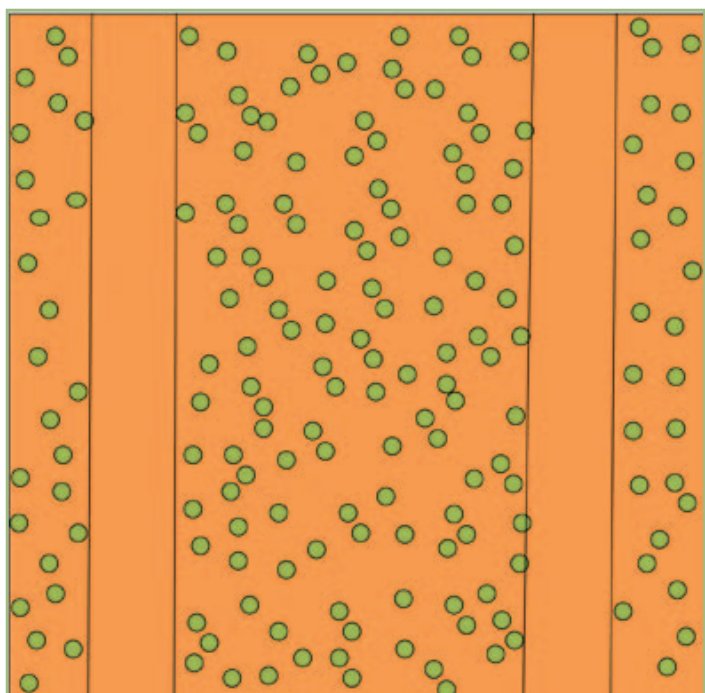


Figura 6. Después del tratamiento propuesto (clareo semi-sistemático del 75% del número de pies). Producción media estimada de 55 t verdes/ha

Cabe una intervención más temprana, consistente en desbroces por fajas, efectuados con desbrozadoras, en general de eje horizontal, que abrirían calles alternas marcha atrás, triturando calles con anchura igual a la altura del apero, en general para dejar el material resultante *in situ*. Tanto en este caso como en desbroces, puede ser de interés ensayar la máquina empacadora Biobaler o, preferentemente, una desbrozadora de eje horizontal seguida de una

empacadora en rotopacas (por ejemplo, Claas) para valorar la posibilidad de recogida rentable de este material en zonas de terreno llano o poco pendiente.

3.3.2 Masas de edad madura y estructura regular o casi: cortas de regeneración

Se han considerado como masas de edad madura aquellas en que la edad media de los árboles muestra superará los 50 años en mitad del periodo de aplicación (8 años después del inventario realizado). Se ha comprobado que en su mayoría se trata de masas de pino carrasco y que su estructura se aproxima casi siempre a una estructura regular (bimodal o multimodal algunas veces) y en muy contadas ocasiones presenta estructura irregular.

Por tanto, se estima conveniente llevar a cabo cortas de regeneración por aclareo sucesivo en dos o tres fases, dependiendo del matorral y la erosionabilidad, que afecten al 100% de las clases diamétricas inferiores y al 50-60% del número de pies de las superiores hasta dejar 50 pies/ha (para las cortas en dos fases) o 100 pies/ha (para las cortas en tres fases, con mayor pendiente o fracción de cabida cubierta de matorral, estos 100 pies por ha se verían reducidos a 50 en la segunda corta, en el próximo periodo de aplicación), en todo caso con un criterio selectivo por vigor y calidad de los futuros árboles padre, de acuerdo con las recomendaciones del PATFOR:

GENERALES

- Cortas selectivas, dispersas y de poca extensión, no en rodales colindantes en años consecutivos
- Dejar en las cortas finales una reserva de 2 a 10 árboles por hectárea
- Criterios de selección de pies: vigorosos, buen estado fitosanitario, mayor tamaño, con discontinuidad vertical y horizontal con el resto de vegetación. No en pendientes fuertes, partes elevadas o vaguadas, a una distancia mínima de pistas, cultivos y aéreas cortafuegos.
- Actuaciones sobre árboles padre: poda hasta cinco metros, sin sobrepasar dos tercios de la altura total o un tercio de la copa. Eliminación selectiva de arbolado y matorral en un círculo de 10 m de diámetro alrededor de cada pie.
- Tender de forma general a masas semirregulares, especialmente en pinares, alargando los periodos de regeneración y con formas de corta de aclareo sucesivo o por bosquetes.
- Reservar un 5-10% sin intervenir o con poca intensidad, en zonas de fuertes pendientes, aisladas, márgenes de arroyos, divisorias,...

ESPECIFICAS PARA PRODUCCION DE BIOMASA

- La selvicultura menos intensiva se aplica cuando el principal objetivo no es la producción de biomasa
- En lo posible, dejar en el monte la biomasa a extraer hasta que se desprenda el mayor porcentaje de ramillas y acículas.
- Tratar los restos no aprovechables, preferentemente por astillado o trituración.

Del estudio del inventario se deduce que en la superficie inventariada (pinares no sujetos a incendios previos), de las 140 parcelas atribuidas a estratos de pinar, 50 parcelas (un 35,7%) pertenecen a esta categoría.

Para diseñar estas cortas, se ha decidido estratificar por densidades, entre masas maduras de entre 100 y 500 pies/ha, masas de entre 500 y 1.000 pies/ha y masas de más de 1.000 pies/ha para, a partir de sus distribuciones diamétricas medias, decidir las condiciones del tratamiento. No se han incluido las parcelas de menos de 100 p/ha (que sólo suponen un 6% de las parcelas con masas maduras), en que solo procedería el desbroce y, en su caso, otras medidas de apoyo a la regeneración (laboreo, siembra o plantación).

3.3.2.1. Las masas maduras de entre 100 y 500 pies/ha.

Son la mayoría de las encontradas en las parcelas de inventario (un 76% de las masas maduras) y tienen la siguiente distribución diamétrica media (Figura 7), para un número de pies medio (sin menores) de 278,5 por hectárea:

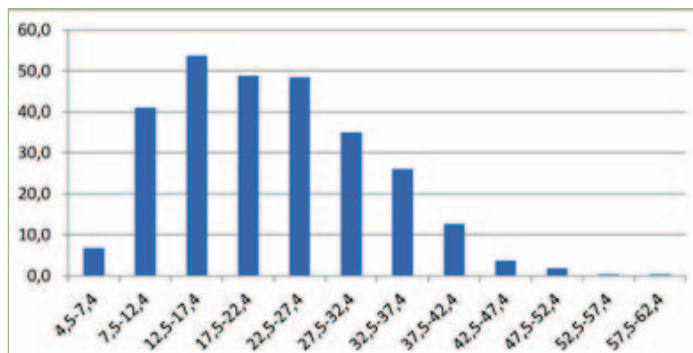


Figura 7. Distribución diamétrica de masas maduras de pino carrasco con densidades bajas

Se trata en su mayoría de fustales de todas las coberturas (10 al 100%) y latizales de cobertura media y alta (50 al 100%) a los que corresponden fracciones de cabida cubierta del matorral de entre el 60 y el 85%, por lo que lo más probable, salvo excepciones, es la corta de regeneración por aclareo en tres fases (dos cortas de aclareo más corta final de árboles padre) acompañadas – al menos, la primera o las dos primeras – de podas y desbroces al menos alrededor de los árboles padre.



Fustal de menos de 500 pies/hectárea

La masa final, con 100 pies/ha, respeta el 56,5% de las clases diamétricas superiores, y es la que se refleja en las siguientes Tabla 5 y Figura 8:

17,5-22,4	22,5-27,4	27,5-32,4	32,5-37,4	37,5-42,4	42,5-47,4	47,5-52,4	52,5-57,4	57,5-62,4	TOTAL
27,6	27,3	19,8	14,7	7,2	2,1	1,1	0,2	0,2	100,1

Tabla 5: Masa final de árboles padre tras la primera corta de aclareo, pinares de carrasco maduro poco densos

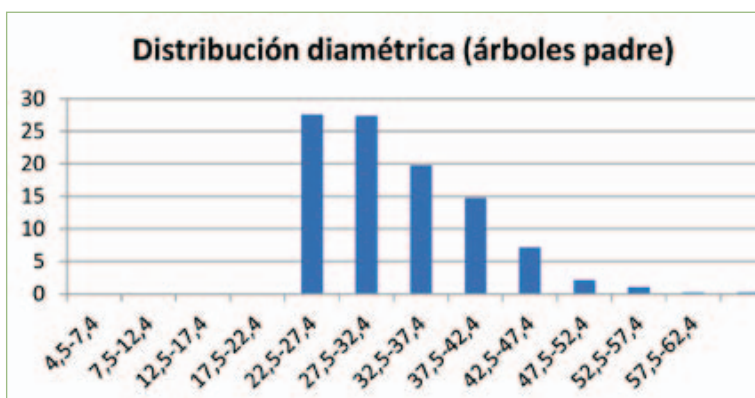


Figura 8. Distribución diamétrica de los árboles padre tras corta de regeneración en pinar maduro poco denso

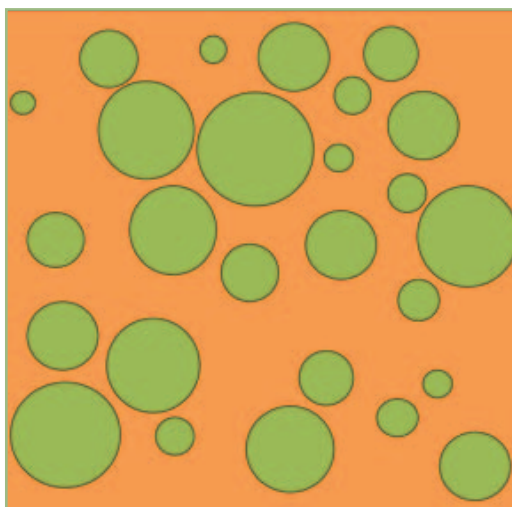


Figura 9. Representación de la estructura media inicial, en masas de edad madura, densidad de 100 a 500 pies/ha (27% de la superficie inventariada)

Ello supone la extracción de los árboles restantes, que para un porcentaje de aprovechamiento de su biomasa del 90%, sería (con los valores modulares de Montero *et al.*, 2005) de 27,0 toneladas verdes por ha (al 45% de humedad).

Se representa esquemáticamente, sobre un cuadrado de 1.000 m², la situación media de este tipo de masas antes y después del tratamiento, en las Figuras 9 y 10.

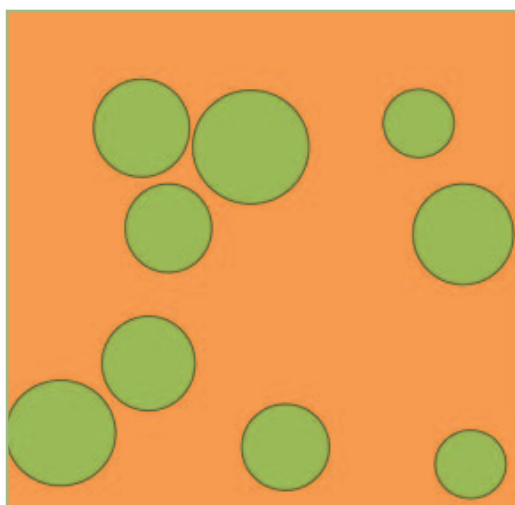


Figura 10. Representación media de la situación después del tratamiento propuesto (cortas de aclareo en tres fases, la primera hasta 100 p/ha acompañadas de posibles podas y desbroces, con producción de 27 toneladas verdes/ha de biomasa arbórea.)

3.3.2.2. Las masas maduras de entre 500 y 1.000 pies/ha.

Suponen un 16% de las encontradas en las parcelas de inventario de masas maduras, y tienen la siguiente distribución diamétrica media (Figura 11), para un número de pies medio (sin menores) de 654 por hectárea:

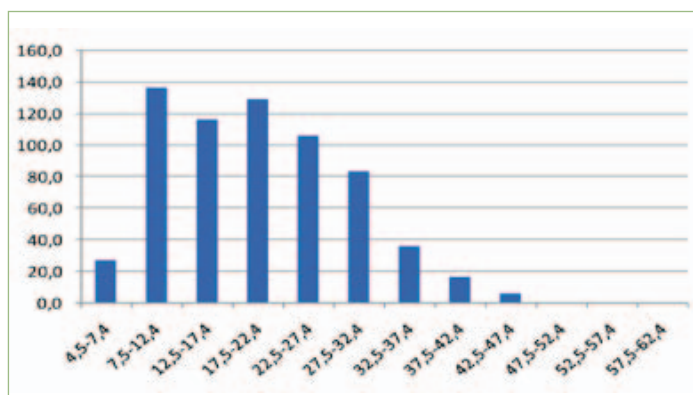


Figura 11. Distribución diamétrica de masas maduras de pino carrasco con densidades medias.

Como se trata de latizales y fustales de cobertura media y alta, también con elevadas fracciones de cabida cubierta de matorral, se optará en general por dos cortas anteriores a la final, y en la primera se dejarán 100 árboles padres por hectárea, desbrozándose al menos en los alrededores de estos pies si se siguen las recomendaciones del PATFOR.

Si se dejan, con criterio positivo de vigor y calidad, el 60% de los pies de las 4 clases de mayores diámetros, se puede completar esta primera fase de las cortas de regeneración con 16,2 pies/ha de la clase 22,5-27,4 cm. La masa remanente de árboles padre tendría como media la distribución diamétrica que reflejan las siguientes Tabla 6 y Figura 12:

22,5-27,4	27,5-32,4	32,5-37,4	37,5-42,4	42,5-47,4	47,5-52,4	52,5-57,4	57,5-62,4	TOTAL
16,2	49,9	21,2	9,5	3,2	0,0	0,0	0,0	100,0

Tabla 6. Masa final de árboles padre tras la primera corta de aclareo, pinares de carrasco maduro de densidad media.



Latizal con densidad entre 500-1.000 pies/ha.

Ello supone la extracción de los árboles restantes, que para un porcentaje de aprovechamiento de su biomasa del 90%, sería (con los valores modulares de Montero *et al.*, 2005) de 48,9 toneladas verdes por ha (al 45% de humedad). Se representan las situaciones anterior y posterior a la corta, sobre un cuadrado de 1.000 m², en las figuras 13 y 14.

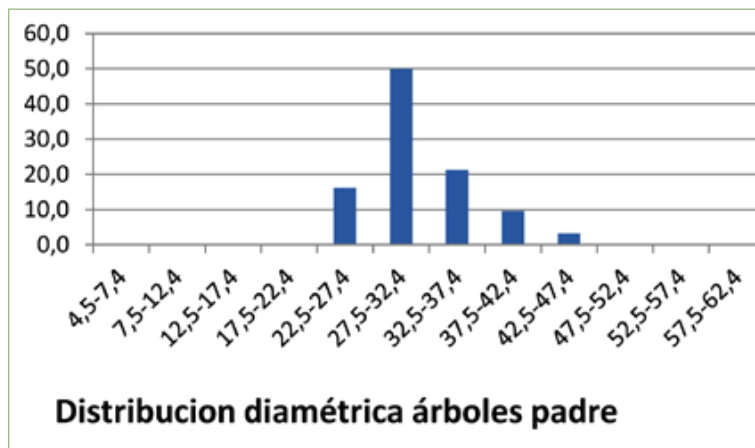


Figura 12. Distribución diamétrica de los árboles padre tras corta de regeneración en pinar de carrasco maduro medianamente denso.

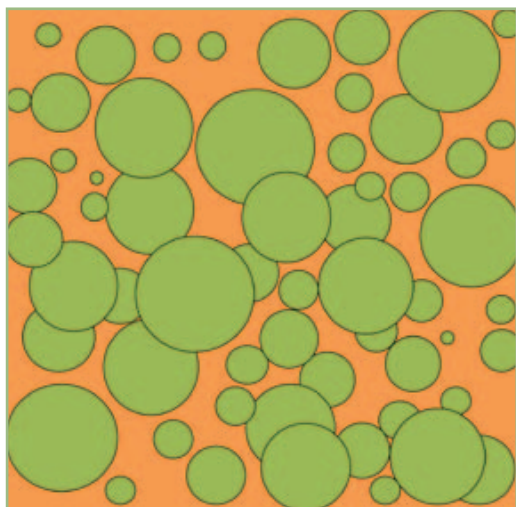


Figura 13. Masas de edad madura, densidad de 500 a 1.000 pies/ha (5% de la superficie inventariada)

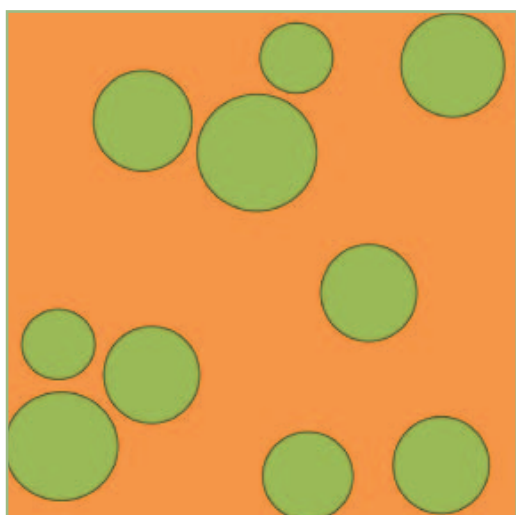


Figura 14. Representación esquemática de la masa tras el tratamiento propuesto (cortas de aclareo en dos fases, la primera hasta 100 p/ha acompañadas de posibles podas y desbroces: 49 toneladas verdes/ha de biomasa arbórea).

3.3.2.3. Las masas maduras con más de 1.000 pies/ha.

Sólo están representadas en el inventario por una única parcela (un 2% de las masas maduras). Un análisis más detallado muestra que probablemente la edad se ha tomado en una muestra de árboles gruesos residuales, puesto que más de 700 pies por hectárea son pies menores y casi 500 están en la clase 7,5 – 12,4, luego realmente no son de aplicación cortas de regeneración, sino en todo caso de mejora, por lo que esta parcela se agrupará con las susceptibles de cortas de mejora.

3.3.3 Masas de edad inmadura y estructura regular o casi: posibles cortas de mejora

Las parcelas sobre masas que aún no han alcanzado la madurez que requiere cortas de regeneración serían finalmente 91 sobre 140, es decir, un 65% de las parcelas sobre masas de pino no quemadas recientemente. El análisis de su necesidad de cortas de mejora se ha llevado a cabo por dos procedimientos, el índice de densidad de Hart-Becking (porcentaje que el espaciamiento supone sobre la altura dominante, que se considera excesivo si

sobrepasa el 25-35% según las especies y calidad de estación) y el Índice de Densidad de Reineke, cuyo valor máximo en una masa se asimila con la máxima densidad posible. Los rodales se consideran densos si este índice supera el 35% de su valor máximo. Hay que señalar que hubiera sido deseable contar con los datos de pies menores, que por debajo de 5 cm no se contabilizaron en el inventario.



Masa inmadura y estructura regular

3.3.3.1. Cortas de mejora con el criterio del índice de Hart-Becking

La distribución en su número de pies / altura dominante de las parcelas de inventario en mitad del periodo de aplicación se representa en la Figura 15. Aplicando un criterio amplio (IH o cociente entre el espaciamiento – al tresbolillo en este caso – y la altura dominante, menor o igual al 35%) sólo tres parcelas (un 3,3% del total) con masas jóvenes tendrían una densidad excesiva y requerirían cortas de mejora. Probablemente en este escaso número influye la forma de estimarse la altura dominante en el inventario de Radinganorum, a través de un único árbol más grueso por parcela (en vez de la altura media de los 7 árboles más gruesos de la parcela, que sería la altura dominante de acuerdo con el criterio de Assman, generalmente admitido), que sobreestimaría dicha altura dominante.

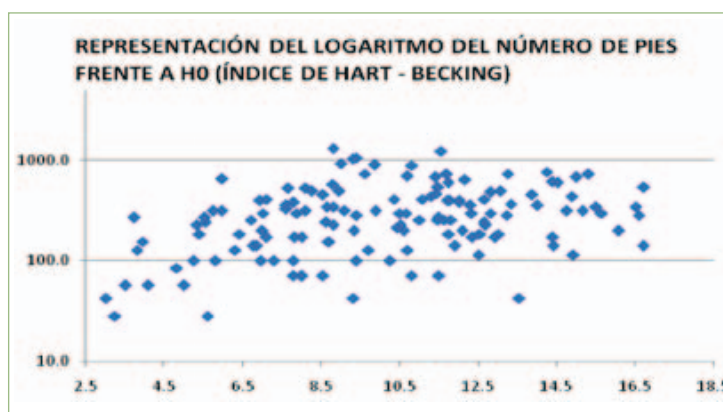


Figura 15. Representación de la densidad en las parcelas de inventario (gráfico de densidad de Hart-Becking)

La representación de la distribución diamétrica media en dichas parcelas se refleja en la Figura 16. Son parcelas de latizal y fustal con coberturas medias y altas y con un número de pies por hectárea superior a 890.

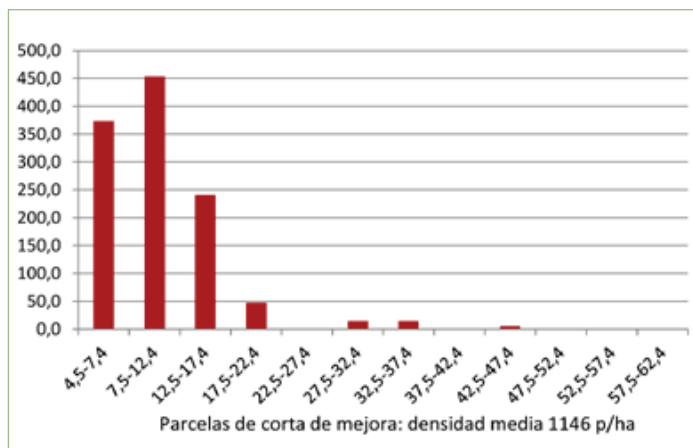


Figura 16. Distribución diamétrica del 3,3% de parcelas jóvenes de densidad excesiva según el criterio de HB

Dado que la proporción de parcelas necesitadas de cortas de mejora parece muy reducida, se exploró el indicador del Índice de Densidad de Reineke.

3.3.3.2. Cortas de mejora con el criterio del índice de Densidad de Reineke

La distribución del diámetro normal medio cuadrático frente al número de pies por hectárea produce una nube de puntos que se considera limitada en su parte superior por la llamada recta límite de Reineke o recta de autoclareo, que representa la densidad máxima para la especie en unas condiciones indicadas (Reineke, 1933). En la siguiente Figura 17, se representan los puntos correspondientes a las parcelas del inventario, pudiendo apreciarse una definición imprecisa de la recta de Reineke y la concentración de las parcelas en áreas alejadas de los valores máximos (esto es, predominio de de espesuras defectivas).

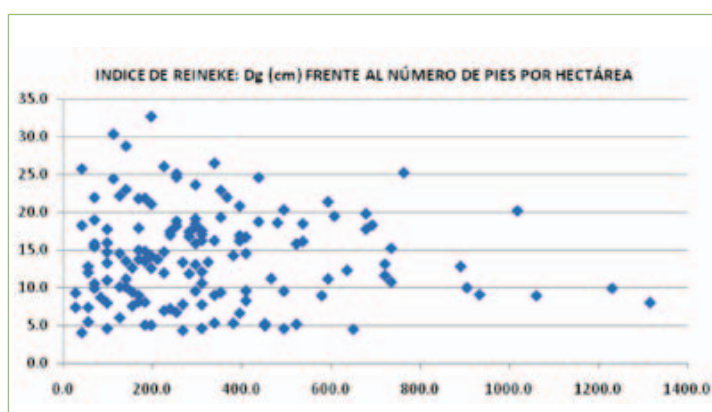


Figura 17. Representación de densidad de las parcelas de inventario según el criterio de Reineke

El análisis de las parcelas cuyo IDR es superior al 35% del máximo (en este caso, próximo a 700), arrojó un total de 16 parcelas supuestamente densas con este criterio (un 17,6% de las parcelas jóvenes). No obstante, un análisis más cuidadoso condujo a la conclusión de que había parcelas claramente poco densas incluidas entre las que necesitaban cortas de mejora – como 5 parcelas de latizales y fustales con menos del 50% de fracción de cabida cubierta y menos de 600 pies/ha -. Se decidió llevar a cabo un análisis más discriminado, teniendo en cuenta también el porcentaje de

cobertura de las copas, y ello permitió definir las estructuras de 10 parcelas (un 11% de las masas jóvenes de pinar no quemado recientemente) con densidad relativamente elevada y susceptibles de cortas de mejora.

El primer grupo es de latizal con fracción de cabida cubierta media-alta y densidad superior a 300 pies/ha, cuya distribución diamétrica se representa en la Figura 18.

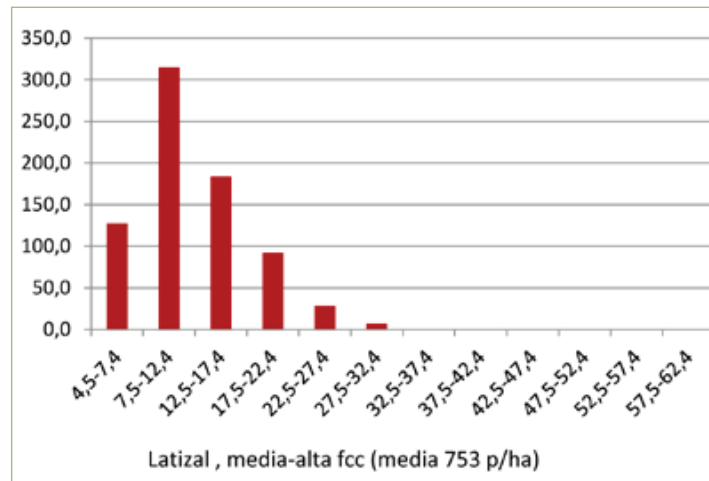


Figura 18. Distribución diamétrica de las parcelas jóvenes de latizal con Fcc media o alta y densidad elevada por el criterio de Reineke (4,4% del total)

El segundo grupo es el de fustales con cobertura también media o alta y densidad de más de 250 pies/ha, cuya distribución diamétrica media se refleja en la Figura 19.

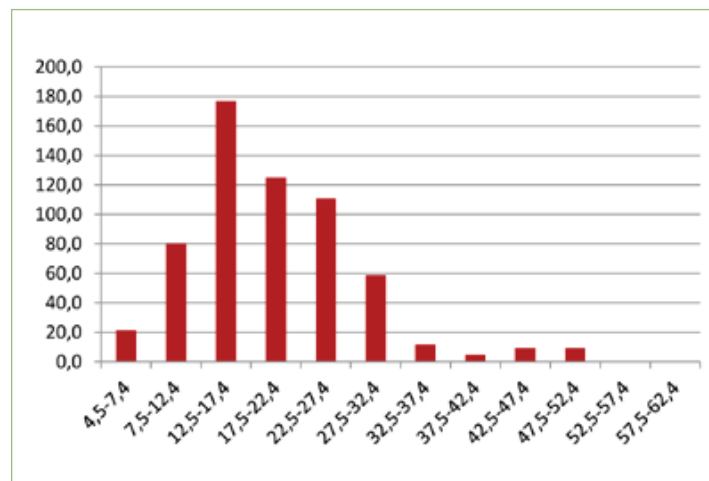


Figura 19. Distribución diamétrica de las parcelas jóvenes de fustal con Fcc media o alta y densidad elevada por el criterio de Reineke (6,6% del total)

En ambos casos, la densidad no resulta muy elevada en relación con las clases diamétricas presentes, por lo que se proponen claras moderadas (del 35% en número de pies) con mayor incidencia en las clases inferiores.

Por ejemplo, en el latizal se podrían extraer dos tercios de todos los pies menores, el 40% de la primera clase diamétrica, el 30% de la siguiente, el 20% de la siguiente y el 10% de las siguientes, por ejemplo, siempre con un criterio selectivo positivo, dejando los pies de mayor vigor y calidad). Para el latizal, el tratamiento propuesto se detalla en la Tabla 7, adjunta, que proporciona una producción de 13 toneladas húmedas de biomasa por hectárea.

Diámetro normal	4,5-7,4	7,5-12,4	12,5-17,4	17,5-22,4	22,5-27,4	27,5-32,4	32,5-37,4	37,5-42,4	42,5-47,4	47,5-52,4	52,5-57,4
Masa inicial	21,2	80,2	176,8	125,0	110,8	58,9	11,8	4,7	9,4	9,4	0,0
Masa final	0,0	40,1	106,1	87,5	88,7	53,1	10,6	4,2	8,5	8,5	0,0
Masa extraída	21,2	40,1	70,7	37,5	22,2	5,9	1,2	0,5	0,9	0,9	0,0
kg biomasa seca/pie	4,4	20,2	49,5	93,5	153,1	229	322	432,5	561,1	708,2	874,2
Biomasa húmeda extraída	0,2	1,3	5,7	5,7	5,6	2,2	0,6	0,3	0,9	1,1	0,0

Tabla 7. Características de las claras en los estratos de latizal denso.

La situación previa y posterior a estas claras en los estratos de latizal se representa en las Figuras 20 y 21, de forma esquemática, sobre un cuadrado de 1.000 m² (10 áreas) de superficie).

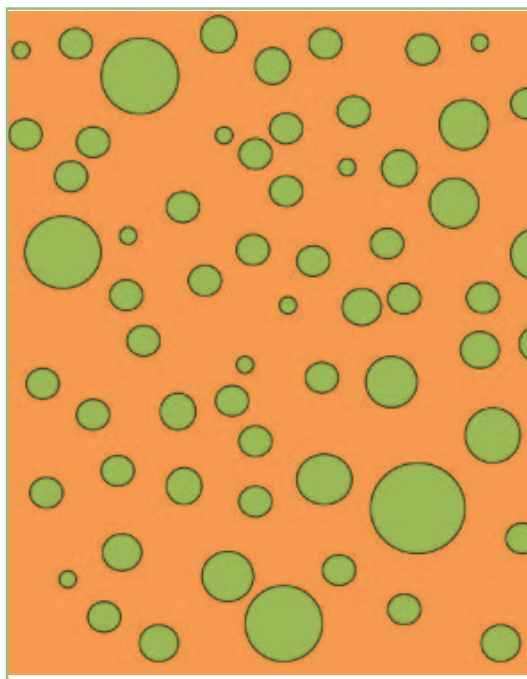


Figura 20. Representación de la estructura arbórea de las masas jóvenes densas en estado de latizal – menos de 20 cm de diámetro - (4,4% de la superficie inventariada)

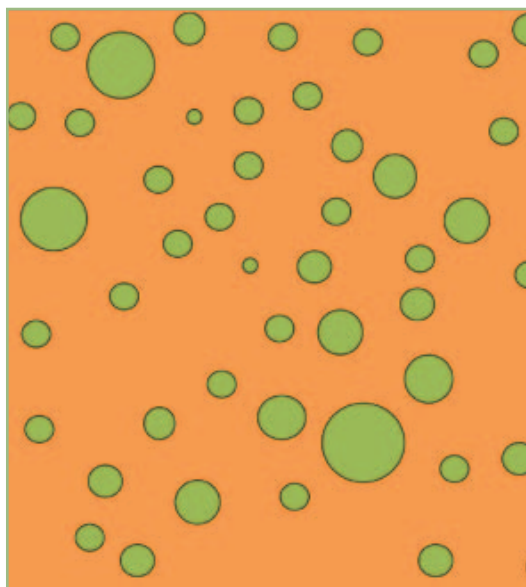


Figura 21. Representación de la estructura de la masa de latizal denso tras el tratamiento propuesto (clara moderada por lo bajo del 35% del número de pies). Producción de 13 toneladas verdes de biomasa arbórea/ha

Para el fustal, se proponen también claras moderadas (del 35% en número de pies) con mayor incidencia en las clases inferiores, en este caso eliminando, por ejemplo, todos los pies menores y una proporción decreciente de los pies de las siguientes clases diamétricas, entre el 50% de la primera, el 40% de la segunda, el 30% de la tercera, el 20% de la cuarta y el 10% de la quinta y sucesivas, con el mismo criterio selectivo y positivo). Se señala el tratamiento propuesto en la Tabla 8, adjunta, tratamiento que daría lugar a una producción media de biomasa de 23,6 t verdes (al 45% de humedad en base húmeda).

ClaseDíamétrica	4,5-7,4	7,5-12,4	12,5-17,4	17,5-22,4	22,5-27,4	27,5-32,4	32,5-37,4	37,5-42,4	42,5-47,4	47,5-52,4	52,5-57,4	57,5-62,4
Masa inicial	127,3	314,8	183,9	92,0	28,3	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Masa final	42,0	188,9	128,7	73,6	25,5	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Masa extraída	85,3	125,9	55,2	18,4	2,8	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
kg biomasa seca/pie	4,4	20,2	49,5	93,5	153,1	229,0	322,0	432,5	561,1	708,2	874,2	1.059,6
Biomasa húmeda extraída	0,6	4,2	4,5	2,8	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 8. Características de las claras en los estratos de fustal denso.

Las características de la masa de fustal denso, antes y después de la clara, se representan sobre un cuadrado de 10 áreas en las Figuras 22 y 23.

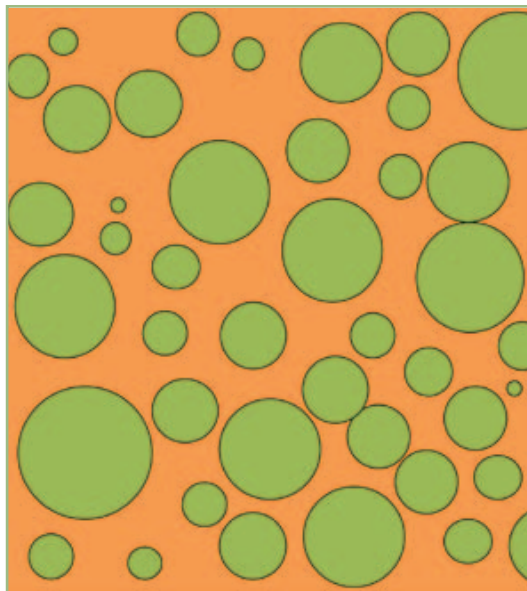


Figura 22. Representación sobre una parcela cuadrada de 10 de la estructura media del estrato arbóreo en masas jóvenes densas en estado de fustal – más de 20 cm de diámetro normal (6,6% de la superficie inventariada).

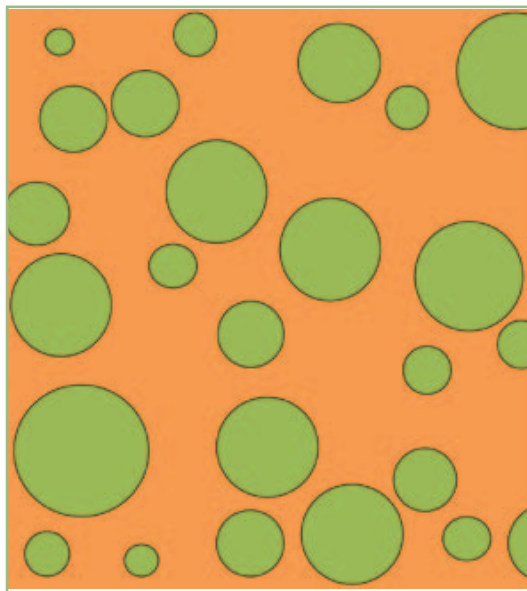


Figura 23. Representación de la estructura media del estrato arbóreo tras el tratamiento propuesto (clara moderada por lo bajo afectando al 35% del número de pies). Producción media estimada de 24 toneladas verdes de biomasa arbórea/ha.

3.3.4 Montes particulares con estructura desregularizada

Se trata de estratos de fustal y latizal (más de 15 cm de diámetro a la altura del pecho o d.a.p.), que corresponden con los siguientes estratos del IFN en Valencia: Estrato 02, con dominio de *Pinus halepensis* en estado de latizal-fustal, y fracción de cabida cubierta entre 20 y 40%, y Estrato 01, con dominio de la misma especie y en el mismo

estado, pero con FCC mayor de 40%, por ello con mayor aptitud para el aprovechamiento. En total, supondrían un 60% de la superficie forestal arbolada en la provincia de Valencia, de los que la mayor parte (en la provincia) serían montes privados.

En ambos casos, se trata de montes desregularizados, con árboles de todos los tamaños, como producto de las prácticas anticulturales de selección por tamaños que se encuentran muy extendidas en los montes de carrasco del levante español. Aunque el objeto a largo plazo de su selvicultura debería ser la transformación en montes regulares, por el carácter heliófilo de la especie y para no hacer una selección fenotípica negativa, la inercia de los propietarios particulares hace pensar que las intervenciones en numerosos casos van a seguir siendo de entresaca diamétrica en que se extraen cada cierto tiempo (se admiten rotaciones entre 15 y 20 años) los pies mayores de 25 ó 30 cm. (que suponen en el caso valenciano, de acuerdo con los datos consultados del IFN, un 14% en número de pies, pero un 45% de las existencias).



Las características dasométricas del porcentaje de montes en que podría ser de interés intervenir se han estimado, después de visitas de campo en 2010 y del contraste con fuentes descriptivas e este tipo de intervenciones (Tolosana *et al.*, 2004), como las siguientes:

- Espesura inicial: 650 pies/ha
- Espesura de la masa a extraer: 125 pies/ha.

Producciones:

- Volumen de madera a extraer ($dn=30$ cm, $hf=8-9$ m, $vu = 0,30$ m³) = 37,5 m³
- Biomasa residual (hasta 7 cm en p.d., según Montero et al., 2005): 0,21 t verdes – al 45% - por pie = 26,1 toneladas verdes/ha (suponiendo un 85% aprovechable, 22,2 toneladas verdes/ha)
- Biomasa residual (hasta 14 cm en p.d., según Montero et al y las tarifas de clasificación de productos desarrolladas para *P. pinaster* en Castilla y León por CESEFOR – programa Cubifor -): 0,31 toneladas verdes/pie = 38,77 toneladas verdes/ha (si se puede aprovechar el 90%, 34,9 t verdes/ha al 45% de humedad)
- Biomasa total aérea (arbórea), según Montero et al, 0,229 t secas por pie (0,416 t verdes, al 45% de humedad), en total, 52,0 t verdes por hectárea (con un 90% de eficiencia del aprovechamiento, 46,8 toneladas verdes – al 45% de humedad, en base húmeda – por hectárea).

3.4 RESUMEN DE APORTACIONES DE LOS GRUPOS DE DISCUSIÓN

La actual situación de los montes en la comunidad valenciana, caracterizados por el paulatino abandono de los usos tradicionales y la falta de gestión (con un considerable aumento de la carga de combustible que intensifica el riesgo de ocurrencia de grandes incendios), hace que cualquier propuesta de actuación englobada en un proyecto de valorización como el presentado, sea considerada como algo NECESARIO, BENEFICIOSO y MUY POSITIVO, por todos los consultados.

La principal barrera detectada está en la VIABILIDAD ECONÓMICA del proyecto global, no en los tratamientos selvícolas propuestos.

El objetivo básico sería que el aprovechamiento de la biomasa sirviese al menos para cubrir los gastos generados de su extracción y transporte (propósito de mínimos), lo que permitiría el mantenimiento del sistema, su sostenibilidad y autogestión. Esta viabilidad económica se sitúa como aspecto fundamental de la propuesta.

Entre los consultados existe acuerdo unánime sobre los criterios técnicos que sostienen las actuaciones propuestas, por los efectos claramente beneficiosos para la conservación, protección y aprovechamiento sostenible del monte (efectos positivos sobre la biodiversidad y actividades cinegética, ganadera y maderera). No obstante se recogen algunas puntualizaciones según los grupos consultados:

- Entre los propios técnicos responsables de la gestión forestal, se percibe como una propuesta NECESARIA, con metodologías de explotación racional, basadas en criterios científicos sólo matizadas de forma puntual.
- Grado de aceptación medio entre los técnicos en prevención de incendios consultados, que la consideran como actuación POSITIVA, con repercusión colateral en la prevención de incendios
- Más cuestionada es la propuesta entre los propietarios particulares, que lo perciben como un cambio en el modelo actual de aprovechamiento, basado en entresaca diamétrica en función de intereses económicos y facilidad de trabajo. Consideran que es directamente la viabilidad económica la que va a permitir aceptar o no las metodologías propuestas, que además exigirían un control de las administraciones para su implantación en el monte particular.

Por tanto, todos los entrevistados vislumbran beneficios muy positivos asociados al proyecto y abogan por la implementación de los nuevos tratamientos como primer paso en la gestión. El mayor reto es la sostenibilidad económica del mismo, con grandes dudas a resolver, cuestionando su viabilidad sin ayudas económicas externas.

La prevención de incendios se configura como una consecuencia colateral de las actuaciones, más que como un fin en sí mismo. Pero resultan insuficientes según los técnicos en prevención y gestión de incendios, para quienes la propuesta aunque mejora, NO MODIFICA EL MODELO DE COMBUSTIBLE ACTUAL, que continúa siendo de alto riesgo (modelo 4), a no ser que se incluyan de modo activo dentro de la misma:

Como recomendaciones finales se plantean:

- 1) Sobre los tratamientos selvícolas
 - Establecer prioridades en las actuaciones
 - Centrarse en un primer momento en las zonas estratégicas con mayor riesgo de incendios y en las zonas más productivas y aprovechables desde el punto de vista de balance energético (por cercanía, accesibilidad y productividad).
 - Hacer una planificación temporal de cada actuación
 - Intensificar algunos tratamientos. Por ejemplo: aumentar la corta en masas adultas de más de 50 años.
- 2) En las fincas particulares
 - Plantear más alternativas; mayor flexibilidad y adaptación a las situaciones concretas.
 - Incentivación económica en caso de baja rentabilidad.
 - Compensación económica en caso de establecer áreas cortafuegos en montes privados.
- 3) Sobre prevención de incendios
 - Desbroces del matorral y podas (estas últimas en menor medida, pero también recomendables) como actividades añadidas en cada propuesta de actuación (no como opción).
 - Plan de mantenimiento para las áreas cortafuegos. Que contemple su limpieza cada 4 años como máximo.
 - Añadir planes de mantenimiento de monte no arbolado y campos de cultivo como áreas cortafuegos.
 - Incluso algún técnico en incendios propone quemas controladas.
 - A nivel estratégico: un plan de desarrollo que tenga en cuenta las zonas estratégicas y puntos críticos, como prioridad para iniciar los tratamientos (escenarios de máximo riesgo).

3.5 ESQUEMA DE SISTEMAS Y MEDIOS DE APROVECHAMIENTO

Los sistemas y medios de aprovechamiento que se han analizado se han adaptado a los principales factores que los condicionan, el tamaño de los árboles y la fisiografía, valorada a través de la pendiente media. En los árboles más gruesos (fustales de cortas de regeneración) se ha priorizado el apeo y, en su caso, elaboración, manual, dada la dificultad de mecanización por la elevada ramosidad y frecuente curvatura de la especie. En la extracción, si el aprovechamiento es integral para biomasa, de acuerdo con las fuentes consultadas que basaban sus recomendaciones en experiencias en la región, se ha optado por el sistema de árboles completos para arrastre con *skidder* o tractor de oruga en las zonas de mayor pendiente y por el de árboles completos o secciones de árbol para la extracción con autocargador. En este último caso, se ha considerado una reunión previa de los arbolillos con tractor de cadenas. También en ese caso, en las cortas de árboles de mayor tamaño, se ha considerado necesario un

desramado parcial y descope previo a la carga, para aumentar la capacidad del remolque, por lo que se ha asignado a la biomasa un sobrecoste debido al incremento en el coste de la saca, en comparación con la extracción de madera tradicional.



Skidder (izquierda) y autocargador (derecha)

El posible aprovechamiento de madera conjuntamente con la biomasa se ha considerado sólo para las cortas de regeneración, que se aplican sobre fustales de mayor tamaño, dando lugar a una producción maderable de mayor valor. En el caso de que el aprovechamiento haya sido mixto, de madera y biomasa para uso energético, se ha considerado la elaboración manual integrada (procurando la concentración de ramas y puntas para facilitar el posterior desembosque de su biomasa con autocargador) y la extracción por separado de madera y residuos. Por ese motivo, se ha considerado como coste de la biomasa el sobrecoste en la elaboración de la madera que se produce por dicha concentración de ramas y puntas.



Corta con motosierra y con procesadora

Posteriormente a la extracción a borde de pista, se ha considerado posible (dependiendo de las distancias de desembosque, que no se han estudiado) la necesidad de un transporte intermedio hasta una pista ancha y cargadero donde fuese posible organizar las operaciones de astillado y/o triturado. En general, se ha valorado como astillable la biomasa extraída en suspensión (con autocargador) y como triturable la biomasa extraída por arrastre o que ha sufrido un proceso mecanizado de concentración de ramas y copas.



Triturado y astillado de biomasa (izquierda y derecha respectivamente)

Los sistemas y medios analizados se representan en la Figura 24.

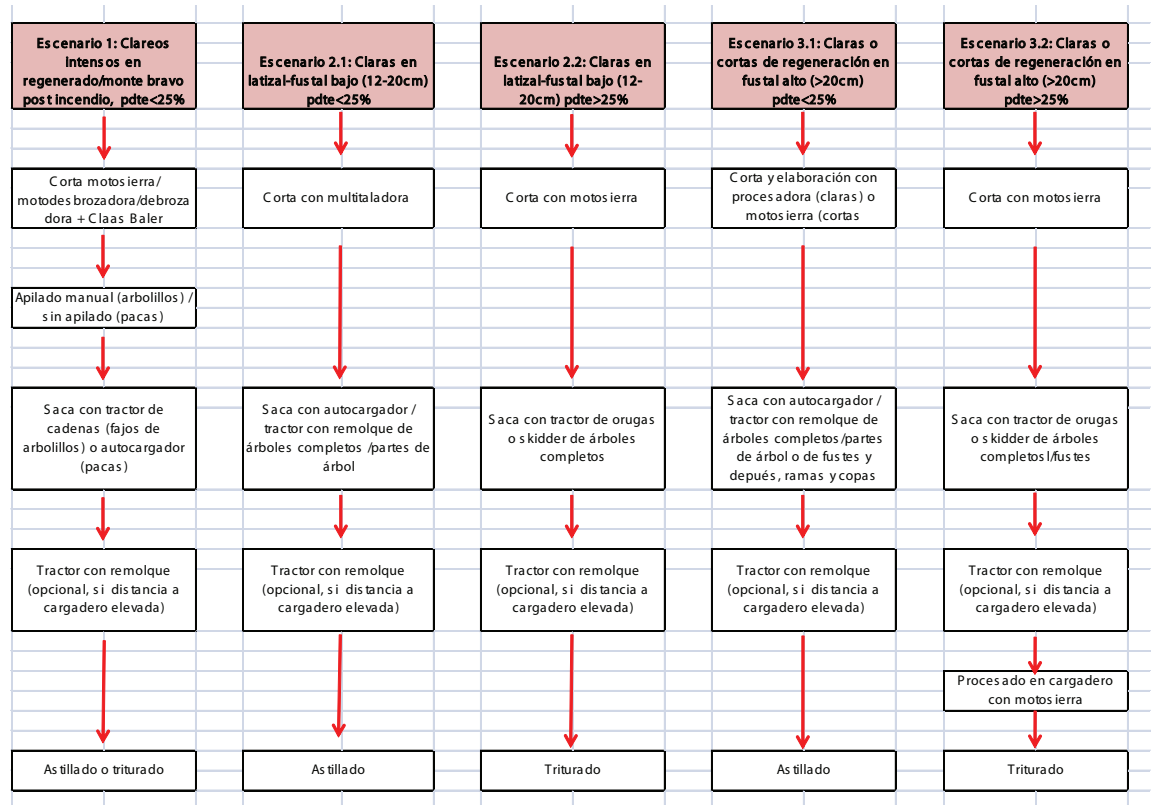


Figura 24. Esquema de los sistemas o medios de aprovechamiento considerados

3.6 CUADRO DE RENDIMIENTOS MEDIOS E INTERVALOS PARA LOS DIFERENTES SISTEMAS Y MEDIOS EN LOS INTERVALOS DE PENDIENTE CONSIDERADOS

Para la estimación de rendimientos, se han seguido referencias bibliográficas y de estudios de mercado, dando prioridad a las basadas en experiencias reales en zonas equiparables por especie, pendiente, tratamiento y área geográfica. (Anexo I).

También se han tenido en cuenta las experiencias adquiridas por Iberdrola Renovables en la explotación de la central termoeléctrica de Corduente, de una potencia de 2 MW. Dicha planta surgió específicamente para consumir el material obtenido en las labores de limpieza de los montes cuyo objetivo era la prevención de incendios.

Como resultado, se obtuvieron los intervalos de rendimientos que se recogen en la Tabla 9 para las operaciones forestales. El transporte se decidió valorarlo a través de intervalos de costes en función de las distancias esperadas, como se refleja en el apartado dedicado a costes unitarios.

RENDIMIENTOS ESTIMADOS DE LAS DISTINTAS OPERACIONES (T AL 45% DE HUMEDAD/HORA DE TRABAJO)

MASAS ARBOLADAS CON MAS DEL 50% FCC Y NECESIDAD DE TRATAMIENTO	PENDIENTE	MOTODESB	BALER	APEO		EXTRACCIÓN		TRATAMIENTO	
				MOTOSIERRA (y amontonado en mb-latizal)	MECANIZADO	AUTOCARG	ARRASTRE (PREVIO EN SU CASO) CON TRACTOR ORUGA O, EN FUSTAL, SKIDDER	ASTILLADO	TRITURADO
MONTE BRAVO DENSO – CLAREO MUY INTENSO – 55 tv/ha	P<25%	5-9 tv/h apeo 0,28-0,57 tv/h amontonado	DESB+BALER solo aplicable en calles, 50-70€/t empacada, recupera el 25%	0,24-0,52 tv/h (0,15-0,24 fuera de calles hechas con desbrozadora y Claas baler)	2,51 tv/h – 1,53 tv/h	5-8 tv/h (7,8-11,5 desembosque de pacas)	-----	6,5-9,5 tv/h	8,2-11,8 tv/h (13,5-16,0 pacas)
	25 < P% < 40	-----	-----	0,18-0,40 tv/h	-----	-----	5-7 tv/h	6,5-9,5 tv/h	8,2-11,8 tv/h
LATIZAL CLARA 13 tv/ha	P<25%	-----	-----	0,85 – 1,25 tv/h para 11-17 tv/ha	3,17 tv/h – 8,5 tv/h	4,2 – 9,1 tv/h	4 – 9 tv/h (reunion tractor)	8-12 tv/h	10,8-15,2tv/h
	25 < P% < 40	-----	-----	1,34 tv/h (3 op) 27,5 tv/ha ---- 1,0 para 13	-----	-----	1,5-3,1 tv/h (tractor, incl. reunion)	8-12 tv/h	10,8-15,2tv/h
FUSTAL CLARA 23,6 tv/ha	P<25%	-----	-----	2,55 tv/h (24 tv/ha) 1,3-2,0 tv/h (22,6 tv/ha)	5,6 – 10,2 tv/h	5,0 – 10,2 tv/h	5,4 tv/h – 10,5 (reunion tractor)	17,8 tv/h (24 tv/ha) 12 tv/h (22,6 tv/ha)	17,2-22,8 tv/h
	25 < P% < 40	-----	-----	2,04 tv/h (24 tv/ha) 1,04-1,6 tv/	-----	-----	3,0-4,5 tv/h (skidder incl reunion)	12,0-17,8 tv/h	17,2-22,8 tv/h
FUSTAL CLARO REGENERACION 27 tv/ha, total	P<25%	-----	-----	6-9 tv/h (con desramado parcial)	-----	5-8 tv/h	-----	10,6-16,4 tv/h	15,5-20,5 tv/h
	25 < P% < 40	-----	-----	8-12 tv/h sin desramado parcial	-----	-----	1,5 tractor – 3,6 skidder tv/h arrastre <100 m	10,6-16,4 tv/h	15,5-20,5 tv/h
FUSTAL CLARO REGENERACION 27 tv/ha, residuos (12 tv/ha)	P<25%	-----	-----	2 €/t por perdida de rendimiento apeo	-----	6,5 – 9,4 tv/h distancia corta	8-11 tv/h amontonado pinza	9,4-12,6 tv/h	12,6-16,4 tv/h
	25 < P% < 40	-----	-----	2,2 €/t por perdida de rendimiento saca	-----	-----	2,0 tv/h arrastre tractor/4,3 arrastre skidder <100 m + procesado con motosierra en cargadero 9-13 tv/h	7,5-10,6 tv/h	10,6-14,1 tv/h
FUSTAL DENSO REGENERACION 49 tv/ha, total	P<25%	-----	-----	8-11 tv/h con desramado parcial	-----	7,5 – 10,6 tv/h dist corta	-----	11,7-16,3tv/h	15 - 25 tv/h
	25 < P% < 40	-----	-----	10-15 tv/h	-----	-----	3,4 – 5,5 tv/h	11,7-16,3tv/h	15 - 25 tv/h
FUSTAL DENSO REGENERACION 49 tv/ha, residuos 20 tv/ha	P<25%	-----	-----	1,5 €/t por perdida de rendimiento apeo	-----	6,5 – 9,4 tv/h distancia corta	12-16 tv/h amontonado pinza	10,1-15,0tv/h	12 - 20 tv/h
	25 < P% < 40	-----	-----	2,8 €/t por perdida de rendimiento saca	-----	-----	2,2 tv/h arrastre tractor/4,5 arrastre skidder <100 m + procesado con motosierra en cargadero 9-13 tv/h	8,4-12,0tv/h	11,1-16 tv/h

Tabla 9. Cuadro de rango de rendimientos (en algunos casos, costes unitarios estimados) para cada operación y medio empleado en los aprovechamientos de biomasa propuestos.

3.7 CUADRO DE COSTES HORARIOS DE LOS MEDIOS DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA

De acuerdo con criterios estándar de evaluación de costes horarios (Miyata, 1980; Arnó y Massip, 2003; Tolosana, González y Vignote, 2004) y empleando la hoja de cálculo y los datos aportados por Iberdrola Renovables (Área biomasa) y los recogidos en los trabajos de campo que dieron lugar al Manual de Aprovechamiento y Elaboración de Biomasa Forestal (Tolosana, 2009), se ha elaborado la tabla de costes horarios de los medios de aprovechamiento que se refleja en la Tabla 10.

	COSTE TOTAL (€/h)
TRACTOR	29,01
REMOLQUE	1,50
CAMIÓN (cargadero-almacén)	52,10
CAMIÓN (almacén-planta)	51,39
CAMIÓN (transp. elementos)	45,79
TRITURADORA	100,05
ASTILLADORA	101,85
BIOBALER	50,56
AUTOCARGADOR	65,05
TRACTOR DE CADENAS	31,90
SKIDDER	59,01
PALA CARGADORA	46,00
PROCESADORA	75,86
MOTOSIERRA	13,56
MOTODESBROZADORA	13,61
MULTITALADORA	61,54

Tabla 10. Estimación de costes horarios de los medios de aprovechamiento.

3.8 CUADRO DE COSTES Y RENDIMIENTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE EL MATORRAL, BAJO ARBOLADO O EN SUPERFICIES NO ARBOLADAS

De la información recabada a los responsables de las labores de prevención y extinción de incendios en la Comunidad Valenciana, se deducen los siguientes cuadros de rangos de costes por hectárea (Tabla 11) para las intervenciones bajo arbolado, que a su vez se diferencian según los intervalos de pendiente que se han considerado, y según si el desbroce es “a hecho” (lo que correspondería a las claras sobre arbolado joven) o selectivo, en un radio de 5 metros alrededor de los árboles padre, lo que correspondería a las cortas de regeneración.

	P (%)	€/ha
Desbroce a hecho de matorral bajo arbolado		
con desbrozadora	<25%	200-1.000 (650)
manual motodesbrozadora	25-40%	350-1.500 (925)
Desbroce selectivo (100 pies/ha)	<25%	400-1.700 (1.050)
Desbroce selectivo (100 pies/ha)	25-40%	560-2.600 (1.580)

Tabla 11. Coste de los desbroces bajo arbolado

Estos tratamientos se considerarán como complementarios de los que se están proponiendo como gestión de las masas arboladas, pero en ningún caso darán lugar a producción rentable de biomasa de calidad (dados los costes reflejados en distintas experiencias en la zona), sino como un posible complemento para mejorar la eficacia del aprovechamiento de biomasa en cuanto a la prevención de incendios. El sobrecoste que supondría la ejecución de estos desbroces se valorará como un añadido al coste unitario de obtención de la biomasa leñosa procedente de los árboles.

Por otro lado, la Tabla 12 se refiere a las intervenciones sobre matorral (no bajo arbolado), que se deberían considerar como actuaciones preventivas de incendios y no como aprovechamientos de biomasa, puesto que el coste de extracción de esa biomasa, de acuerdo con las fuentes consultadas, sería claramente excesivo, y la calidad de la misma no sería admisible para la mayor parte de las aplicaciones. Por ello, se trataría de actuaciones muy convenientes desde el punto de vista de prevención de incendios, pero que no estarían relacionadas en principio con el aprovechamiento de biomasa, sino que su coste debería ser asumido por la propiedad o por la gestión

(Ayuntamientos o Administración forestal). Las superficies totales se corresponderían al desbroce completo de toda la superficie de matorral presente en la zona inventariada, que debería planificarse (no necesariamente de forma total) en un plazo, por ejemplo, en los 15 años de aplicación de la gestión propuesta.

Hay que tener también en cuenta que se presentan rangos de costes aportados por empresas que trabajan en la zona en masas de similares características y que estos valores se podrían ajustar en función de la Fcc del matorral y su diámetro basal, información no disponible en el momento de redacción del presente informe.

PENDIENTE (%)	ACTUACIÓN	S (ha)	€/ha	RENDIMIENTO (h/t)
<25%	Desbrozadora de cadenas o martillos (1)	19.307,7	200-1.100 (650)	0,94
25-40%	Motodesbrozadora	1.192,5	350-1.500 (925)	9,22

Tabla 12. Rangos de costes de los tratamientos de desbroces preventivos sobre matorral o regenerado (no bajo arbolado)

Finalmente, una alternativa a la realización de estos desbroces en áreas extensas, con menores costes pero también con escasa eficacia preventiva, es la ejecución de infraestructuras lineales de defensa (líneas o áreas cortafuego) que suponen más bien un importante apoyo infraestructural para la extinción, más que un elemento de prevención.

Se ha estudiado también el coste de la apertura de este tipo de infraestructuras en la zona inventariada, tanto bajo la hipótesis de anchuras estándar (*buffer* lineal) como bajo la hipótesis de anchuras variables optimizadas mediante el algoritmo *fuzzy* expuesto en ese informe. Las superficies de actuación en la zona objeto del presente estudio se reflejan en la Tabla 13.

ORDEN	MODELOS	SUPERFICIE BUFFER FUZZY (m ²)	SUPERFICIE BUFFER LINEAL (m ²)
1 ^{er} orden	Pasto	131.400	214.696
	Matorral	15.734.928	27.037.252
	Pasto-matorral	7.610.924	12.130.348
	matorral bajo arbolado	11.748.012	22.078.960
2 ^o orden	Pasto	16.492	31.616
	Matorral	4.213.524	7.695.108
	Pasto-matorral	1.815.108	3.138.204
	matorral bajo arbolado	3.173.188	6.481.740

Tabla 13. Superficies a tratar como aéreas de defensa sobre los distintos modelos de combustible según el criterio de *buffer* lineal y de *buffer* variable *fuzzy*, de acuerdo con el informe del INIA

De cara a plantear los métodos de ejecución de estas actuaciones (mecanización o no), en las condiciones de estudio el factor más limitante es la pedregosidad del terreno, cuestión que se identifica como principal atributo a considerar en próximos estudios. Obviamente, se priorizará la actuación mecánica, si es posible y en pendientes inferiores al 30%.

En las áreas de defensa ocupadas por matorral, se plantea desbrozar "a hecho" (con extracción de, al menos, el 75% de la cobertura). En las superficies ocupadas por matorral bajo arbolado se trata de un desbroce selectivo. Además de la pendiente, los rendimientos y costes de los desbroces dependen de la Fracción de Cobertura (Fcc) y del tamaño (diámetro basal) del matorral, información de la que no se dispone en el momento de redacción de este informe, por lo que se aportan valores promedio.

En todo caso, empleando los valores medios de los rangos de costes sobre las superficies de las infraestructuras consideradas, se han estimado los costes que se reflejan en la Tabla 14 por modelos de combustible, recogiendo también el ahorro porcentual que se estima que se obtendría siguiendo la metodología optimizada (análisis *fuzzy* de pertenencia difusa).

	MODELOS	S. FUZZY (ha)	€/ha	€	S. BUFFER LINEAL (ha)	€/ha	€	% REDUCCIÓN
1	Pasto	13,14	350,00	4.599,00	21,47	350,00	7.514,36	38,80
	Matorral	1.573,49	600,00	944.095,68	2.703,73	600,00	1.622.235,12	41,80
	Pasto-matorral	761,09	450,00	342.491,58	1.213,03	450,00	545.865,66	37,26
	Matorral bajo arbolado	1.174,80	2.000,00	2.349.602,40	2.207,90	2.000,00	4.415.792,00	46,79
2	Pasto	1,65	350,00	577,22	3,16	350,00	1.106,56	47,84
	Matorral	421,35	600,00	252.811,44	769,51	600,00	461.706,48	45,24
	Pasto-matorral	181,51	450,00	81.679,86	313,82	450,00	141.219,18	42,16
	Matorral bajo arbolado	317,32	2.000,00	634.637,60	648,17	2.000,00	1.296.348,00	51,04
TOTALES		4.444,36		4.610.494,78	7.859,32		8.491.787,36	45,71

Tabla 14. Costes de apertura/mantenimiento de áreas cortafuegos para las dos metodologías de diseño de áreas cortafuego (lineal y fuzzy) por modelos de combustible y porcentaje de ahorro con la metodología optimizada

En la Tabla 15 se recoge el gasto total según el modelo de combustible, independientemente de las superficies de cada una pertenecientes a áreas cortafuegos de tipo 1 o tipo 2. También se consigna una columna final con el ahorro que supondría aplicar la metodología difusa *fuzzy*.

MODELOS	S. FUZZY (ha)	€/ha	€	S. BUFFER LINEAL (ha)	€/ha	€	AHORRO €
Pasto	14,79	350,00	5.176,22	24,63	350,00	8.620,92	3.444,70
Matorral	1.994,85	600,00	1.196.907,12	3.473,24	600,00	2.083.941,60	887.034,48
Pasto-matorral	942,60	450,00	424.171,44	1.526,86	450,00	687.084,84	262.913,40
Matorral bajo arbolado	1.492,12	2.000,00	2.984.240,00	2.856,07	2.000,00	5.712.140,00	2.727.900,00
TOTALES	4.444,36		4.610.494,78	7.880,79		8.491.787,36	3.881.292,58

Tabla 15. Costes totales de apertura/mantenimiento de áreas cortafuegos en el área de estudio y ahorro estimado si se diseñan las áreas mediante la metodología fuzzy de anchura variable optimizada.

En todo caso, estos tratamientos de creación de infraestructuras de defensa tampoco se consideran, de acuerdo con las experiencias de que se tiene constancia, como un procedimiento de obtención rentable de biomasa de calidad, sino como una inversión a efectuar por la propiedad o la gestión de los montes, con las posibles ayudas públicas que correspondieran.

3.9 CUADRO DE SUPERFICIES ARBOLADAS A TRATAR Y POSIBILIDADES PARA USO ENERGÉTICO EN FUNCIÓN DE USO EXCLUSIVO O MIXTO

La superficie total que requiere tratamientos selvícolas durante el periodo de 15 años de aplicación de la gestión propuesta y anual, junto con la producción anual correspondiente en toneladas húmedas si se ejecutaran todos los tratamientos convenientes desde el punto de vista selvícola, se reflejan en la Tabla 16, en función del tipo de masa y de tratamiento, y de su intervalo de pendiente.

		SUPERFICIE QUE REQUIERE CLARAS				SUPERFICIE DE FUSTAL DENSO A REGENERAR				SUPERFICIE DE FUSTAL MENOS DENSO A REGENERAR				TOTAL	
		Total (ha)	% sup. intentada	Sup. anual (ha)	Prod. anual (t al 45%)	Total (ha)	% sup. intentada	Sup. anual (ha)	Prod. anual (t al 45%)	Total (ha)	% sup. intentada	Sup. anual (ha)	Prod. anual (t al 45%)	Sup. anual (ha)	Prod. anual (t al 45%)
<25% Pendiente	Fustal	821,6	0,65	54,8	1.314,6	469,8	0,37	31,3	1.534,8	800,0	0,6	53,3	1.439,9		
	Latizal	560,0	0,44	37,3	485,4										
	Monte Bravo	271,9	0,22	18,1	997,0										
	Total													194,9	5.771,7
Pendiente 25-40%	Fustal	176,2	0,14	11,7	282,0	100,8	0,08	6,7	329,2	171,6	0,1	11,4	308,8		
	Latizal	76,9	0,06	5,1	66,7										
	Monte Bravo	30,6	0,02	2,0	112,1										
	Total													37,1	1.098,7
TOTAL GENERAL														232,0	6.870,4

Tabla 16. Superficies de pendiente inferior al 40% que requieren tratamientos selvícolas del vuelo arbóreo, junto con la correspondiente producción (máxima) de biomasa húmeda (al 45% e n base húmeda)

3.10 CUADRO DE COSTES UNITARIOS MEDIOS E INTERVALOS PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO, PENDIENTE Y USO, INCLUYENDO Y SIN INCLUIR TRATAMIENTOS SOBRE EL MATORRAL

La siguiente Tabla 17 refleja los costes de los tratamientos propuestos, sin incluir desbroces de matorral. Los costes de las operaciones del aprovechamiento se han derivado de los costes horarios de los medios empleados y sus rangos de rendimientos. Los costes de transporte intermedio (que no siempre será necesario, dependiendo de factores infraestructurales) oscilan de 0 a 4 €/t, mientras que el transporte de astilla o material triturado, a distancias entre 30 y 75 km, se ha evaluado entre 5 y 10 €/t. Los costes fijos, de estructura e indirectos se han evaluado en un 14% de la suma de costes directos, y los beneficios de la empresa de suministro, en un 10% de la suma total de los costes. Es importante destacar que no se ha asignado un coste a la biomasa en pie (se supone que la propiedad debería ser retribuida por la gestión, en otro caso no tendría una motivación para vender su biomasa, pero se ha optado por no considerar este coste adicional). Los costes unitarios medios que se obtienen de esta estimación se han clasificado en intervalos que se corresponden con colores en la Tabla 17. Solo el primer intervalo (<50 €/t al 30%) se puede considerar competitivo a precios actuales de mercado, siempre que la planta obtenga la subvención y tenga un tamaño suficiente. Las actuaciones rentables corresponden solo a cortas de regeneración con aprovechamiento integral para biomasa (excepto en el fustal denso, en que resulta también rentable el aprovechamiento de residuos después de extraer la madera).

Intervalos:	Astilla 30%	<=50 €/t	51-75 €/t	76-100 €/t	>101 €/t
	Triturado 30%	<=48 €/t	49-70 €/t	71-90 €/t	>91 €/t

MASAS ARBOLADAS CON MAS DEL 50% FCC Y NECESIDAD DE TRATAMIENTO	PENDIENTE	COSTES DIRECTOS APROVECHAMIENTO	TRANSPORTE INTERMEDIO	TRANSPORTE A FABRICA	+14% COSTES FIJOS, INDIRECTOS Y ESTRUCTURA	+10% BENEFICIOS EMPRESA EJECUTORA	COSTE TOTAL EN PLANTA	COSTE MEDIO €/t al 30%
MONTE BRAVO DENSO – CLAREO MUY INTENSO – 55 tv/ha	P<25% MULTITALADORA	24,5/40,2+8,1/13+8,5/12,2 = 41,1/65,4 53,3	0-4	5-10	6,5/9,2	5,3/7,5	57,8/82,0 (69,9 €/tv)AST	89,0
	P<25% CLAASBALER + MOTOSIERRA	$[1/44,71] \cdot [(50-70) \text{ €/t} + 5,7/8,3 + 4/6+6,3/7,4]) \cdot 0,25 \cdot 55 / 4 + (56,5/90,4 + 8,1/13+8,5/12,2) \cdot 0,75 \cdot 55 = 72,5/113,7$ 93,1	0-4	5-10	10,9/17,9	8,8/14,6	97,2/160,1 (128,7 €/tv)TRIT	163,8
	P<25% MOTODESBROZ	1,5/2,7+21,1/42,9+8,1/13+8,5/12,2 = 39,2/70,8 55,0	0-4	5-10	6,2/11,9	5,0/9,7	55,4/106,3 (80,9 €/tv)AST	103,0
	P<25% MOTOSIERRA	26,2/56,7 + 8,1/13+8,5/12,2 = 42,8/81,9 62,4	0-4	5-10	6,7/13,4	5,4/10,9	59,9/120,3 (90,1 €/tv)AST	114,7
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	34,0/75,6 + 4,6/6,4 + 8,5/12,2 = 47,1/94,2 70,7	0-4	5-10	7,3/15,1	5,9/12,3	65,3/135,7 (100,5 €/tv)TRIT	127,9
LATIZAL CLARA 13 tv/ha	P<25% MULTITALADORA	7,2/19,4 + 7,1/15,5+8,5/12,7 = 22,8/47,6 35,2	0-4	5-10	3,5/8,6	2,9/7,0	31,4/77,2 (54,3 €/tv)AST	69,1
	P<25% MOTOSIERRA	10,9/16,0 + 3,5/8,0 + 7,1/15,5 + 8,5/12,7 = 30,0/52,2 41,1	0-4	5-10	4,9/9,3	4,0/7,6	43,9/83,0 (63,5 €/tv)AST	80,8
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	13,6 + 10,3/21,2 + 6,6/9,3 = 30,5/44,1 37,3	0-4	5-10	5,9/8,1	4,8/6,6	53,0/72,9 (62,9 €/tv)TRIT	80,1
FUSTAL CLARA 23,6 tv/ha	P<25% PROCESADOORA	6,0/11,0 + 6,4/13,0 + 5,7/8,5 = 18,1/32,5 25,3	0-4	5-10	3,2/6,5	2,6/5,3	29,0/58,3 (43,7 €/tv) AST	55,6
	P<25% MOTOSIERRA	5,3/10,5 + 6,4/13,0 + 3,0/5,9 + 5,7/8,5 = 20,4/37,9 29,2	0-4	5-10	3,6/7,3	2,9/5,9	31,9/65,1 (48,5 €/tv) AST	61,7
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	6,7/13,8 + 13,1/19,7 + 4,4/5,8 = 24,2/39,3 31,8	0-4	5-10	4,1/7,5	3,3/6,1	36,6/66,8 (51,7 €/tv) TRIT	65,8
FUSTAL MADURO NO DENSO REGENERACION 27 tv/ha, total	P<25% MOTOSIERRA	1,5/2,3 + 8,1/13,0 + 6,2/9,6 = 15,8/24,9 20,4	0-4	5-10	2,9/5,4	2,4/4,4	26,1/48,8 (37,4 €/tv) AST	47,6
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	1,1/1,7 + 16,4/21,3 + 4,9/6,5 = 22,4/29,5 26,0	0-4	5-10	3,8/6,1	3,1/5,0	34,4/54,5 (44,5 €/tv) TRIT	56,6
FUSTAL MADURO NO DENSO REGENERACION, residuos (12 tv/ha)	P<25% MOTOSIERRA	2+2,9/4,0+6,9/10,0 + 8,1/10,8 = 19,9/26,8 23,4	0-4	5-10	3,5/5,7	2,8/4,7	31,2/51,2 (41,2 €/tv) AST	52,4
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	2,2 + 13,7/16 + 1,0/1,5 + 7,1/9,4 = 24/29,1 26,6	0-4	5-10	4,1/6,0	3,3/4,9	36,4/54,0 (45,2 €/tv) TRIT	57,5
FUSTAL MADURO DENSO REGENERACION 49 tv/ha, total	P<25% MOTOSIERRA	1,2/1,7 + 6,1/8,7 + 6,2/8,7 = 13,5/19,1 16,3	0-4	5-10	2,6/4,6	2,1/3,8	23,2/41,5 (32,4 €/tv) AST	41,2
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	0,9/1,4 + 10,7/17,4 + 4,0/6,7 = 15,6/25,5 20,6	0-4	5-10	2,9/5,5	2,3/4,5	25,8/49,5 (37,7 €/tv) TRIT	48,0
FUSTAL MADURO DENSO REGENERACION, residuos 20 tv/ha	P<25% MOTOSIERRA	1,5 + 2,0/2,7 + 6,9/10,0 + 6,8/10,0 = 17,2/24,2 20,7	0-4	5-10	3,1/5,3	2,5/4,4	27,8/47,9 (37,9 €/tv) AST	48,2
	25 < P% < 40 MOTOSIERRA	1,8 + 13,1/14,5 + 1,0/1,5 + 6,3/9,0 = 22,2/26,8 24,5	0-4	5-10	3,8/5,7	3,1/4,7	34,1/51,2 (42,6 €/tv) TRIT	54,2

Tabla 17. Costes unitarios (rangos y valores medios) de la biomasa puesta en planta a humedad de consumo del 30%, incluyendo transporte, costes fijos, indirectos y de estructura y beneficio de la empresa ejecutora.

La estimación de costes ha llevado a algunos resultados preliminares de interés, que parecen indicar que la mecanización con multitaladora mejora los costes en los clareos de montes bravos post incendio, mientras que el uso de motosierra, sola o combinada con desbrozado y empacado en las calles, es excesivamente cara, teniendo el clareo con motodesbrozadora un coste intermedio (en todo caso, los costes medios superan los 85€/t al 30%). Las intervenciones de mejora (claras) sobre latizal y fustal van reduciendo sus costes, lógicamente, según aumenta el tamaño de los arboles. Es notable que en ambos casos la alternativa económicamente más conveniente es la mecanizada, que corresponde a las pendientes de menos del 25% (que son las más abundantes en las zonas arboladas que se han estudiado)

La inclusión de costes de desbroce empeora la situación desde el punto de vista de los costes, aunque merece la pena evaluar en qué medida. Los desbroces, como se ha indicado, tendrían sentido acompañando a las claras sobre latizal y fustal, caso en que serían “a hecho” o acompañando a las cortas de regeneración, caso en que serían

predominantemente selectivas, alrededor de los árboles padre. Los costes debidos al desbroce y su repercusión sobre los costes unitarios de obtención de la biomasa se presentan en la Tabla 18. Se puede observar que todos los tratamientos salen del margen de rentabilidad, tan solo las cortas de regeneración en fustal denso y pendientes moderadas, si se aprovecha la madera para biomasa, permiten mantener un coste final en planta inferior a los 75 €/t al 30% de humedad.

Clase de edad-estado de masa	Tratamiento	Pendiente	Coste por ha (€/ha)	Coste, €/t de biomasa (al 30%)	Coste mínimo medio final biomasa (€/t al 30%)	Coste medio final biomasa aprov. mixto con madera (€/t al 30%)
Latizal	Clara	p<25%	200-1.100 (650)	15,4-84,6 (50,0)	119,1	-----
		25-40%	350-1.500 (925)	26,9-115,4 (71,2)	151,3	-----
Fustal joven	Clara	p<25%	200-1.100 (650)	8,5-46,6 (27,5)	83,1	-----
		25-40%	350-1.500 (925)	14,8-63,6 (39,2)	105	-----
Fustal maduro poco denso	C. regeneracion	p<25%	400-1.700 (1.050)	14,8-63,0 (38,9)	86,5	91,3
		25-40%	560-2.600 (1.580)	20,7-96,3 (58,5)	115,1	116
Fustal maduro denso	C. regeneracion	p<25%	400-1.700 (1.050)	8,2-34,7 (21,4)	62,6	69,6
		25-40%	560-2.600 (1.580)	11,4-53,1 (32,2)	80,2	86,4

Tabla 18. Costes mínimos de la biomasa (con la combinación óptima de medios) si en los tratamientos se incluyen desbroces preventivos.

3.11 CUADRO DE POSIBILIDADES POR INTERVALOS DE COSTES UNITARIOS, CON O SIN TRATAMIENTO DEL MATORRAL Y CON O SIN APROVECHAMIENTO MIXTO CON MADERA

En la Tabla 19 se presenta la distribución de la superficie necesitada de actuaciones y del correspondiente volumen de biomasa a extraer de las mismas en función de los costes unitarios medios, estimados mediante los criterios indicados en apartados precedentes, distinguiendo que se aproveche todo el material leñoso arbóreo para uso energético, en forma de astilla o material triturado, o bien se deje para su uso como madera sólida los fustes de los pies más gruesos, concretamente los que son objeto de apeo en las cortas de regeneración.

En el primer caso, uso de la biomasa arbórea para uso energético en exclusivo, se obtendría de la superficie estudiada un total de 5.398,4 toneladas al 30% de humedad (en base húmeda) al año, de las que un 48,1% se obtendrían a un coste puesto en planta inferior a 48/50 €/t– según se hable de material triturado o astilla -, a partir de las cortas de regeneración en fustal denso o en fustal menos denso con pendientes moderadas -, mientras un 29% de la astilla se obtendría a costes entre 51 y 75 €/t (49 y 70 en el caso del material triturado)– procediendo de las citadas cortas de regeneración sobre fustal menos denso en terrenos pendientes, claras sobre fustales y claras mecanizadas sobre latizales en terrenos con pendientes moderadas. Un 11,8% de la biomasa astillada se obtendría a costes entre 76 y 100 €/t de astilla (71 y 90 para el material triturado) de las claras no mecanizadas sobre latizal en pendientes suaves y de las claras en terreno pendiente, así como de los clareos mecanizados sobre montes bravos post incendio en pendientes suaves. El restante 10% se obtendría a costes unitarios medios en planta superiores a 101 €/t de astilla (91 para el triturado) procedente del resto de intervenciones.

En caso de que la madera de los fustes de las cortas de regeneración se emplease como madera sólida, la cantidad anual potencial se reduciría a 3.766,4 t al 30%, y la proporción de biomasa a menor coste se reduciría mucho, pasando las proporciones de material menos caro al 13,1%, el siguiente intervalo - entre 51 y 75 €/t en el caso de la astilla – representaría un 54% del total, y los siguientes porcentajes aun más caros representarían respectivamente el 16,9 y el 12,7% del peso total.

MASAS ARBOLADAS CON MAS DEL 50% FCC Y NECESIDAD DE TRATAMIENTO, APROVECHAMIENTO SIN DESBROCE	Pendiente, forma de ejecucion	Aprovechamiento solo de biomasa				Aprovechamiento de biomasa y madera (fustes de las cortas de regeneración)			
		t/año al 30% p<48- 50€	t/año al 30% p=51- 75€	t/año al 30% p=76- 100 €	t/año al 30% p>100 €	t/año al 30% p<48- 50€ sin madera de cor- tas reg fustal	t/año al 30% p=51- 75€ sin madera de cor- tas reg fustal	t/año al 30% p=76-100 € sin madera de cor- tas reg fustal	t/año al 30% p>100 € sin madera de cor- tas reg fustal
MONTE BRAVO DENSO – CLAREO MUY INTENSO – 55 tv/ha (43,2 t al 30%/ha)	<25% (50% multitaladora, 50% otras)	---	---	391,7	391,7	---	---	391,7	391,7
	25-40%	---	---	---	88,1	---	---	---	88,1
LATIZAL CLARA 13 tv/ha (10,2 t al 30% por ha)	<25% (50% multitaladora, 50% otras)	---	190,7	190,7	---	---	190,7	190,7	---
	25-40%	---	---	52,4	---	---	---	52,4	---
FUSTAL CLARA 23,6 tv/ha (18,5 t al 30% por ha)	<25%	---	1.032,9	---	---	---	1.032,9	---	---
	25-40%	---	221,5	---	---	---	221,5	---	---
FUSTAL MADURO NO DENSO REGENERACION 27 tv/ha, total (21,2 t al 30%/ha)	<25% todo biomasa	1.131,4	---	---	---	---	---	---	---
	25-40% todo biomasa	---	242,7	---	---	---	---	---	---
FUSTAL MADURO NO DENSO REGENERACION, residuos (12 tv/ha, 9,4 t al 30% por ha)	<25% madera+ biomasa	---	---	---	---	---	501,7	---	---
	25-40% madera+biomasa	---	---	---	---	---	107,6	---	---
FUSTAL MADURO DENSO REGENERACION 49 tv/ha, total (38,5 t al 30% por ha)	<25% todo biomasa	1.205,9	---	---	---	---	---	---	---
	25-40% todo biomasa	258,6	---	---	---	---	---	---	---
FUSTAL MADURO DENSO REGENERACION, residuos 20 tv/ha (15,7 t al 30% por ha)	<25% madera+ biomasa	---	---	---	---	491,8	---	---	---
	25-40% madera+biomasa	---	---	---	---	---	105,6	---	---
TOTAL t AL 30% SEGÚN PRECIOS (Y POSIBLE APROVECHAMIENTO DE MADERA EN CORTAS DE REG. DE FUSTAL)		2.595,9	1.687,8	634,8	479,8	491,8	2.160,0	634,8	479,8
TOTAL %		48,1	31,2	11,8	8,9	13,1	57,3	16,9	12,7

Tabla 19. Distribución de la biomasa potencial arbórea por costes unitarios en planta, en función de que la madera más gruesa se utilice o no para uso energético, en caso de no llevarse a cabo desbroces preventivos de incendios simultáneamente a los tratamientos selvícolas.

En la Tabla 20 se muestra la misma distribución de biomasa potencial por costes unitarios en planta en caso de acompañarse las claras de desbroces extensivos y las cortas de regeneración de desbroces puntuales en un radio de cinco metros alrededor de los 100 árboles padre por hectárea. Los costes se elevarían sustancialmente, incluso en el caso de aprovecharse toda la madera para uso energético, reduciéndose a cero el porcentaje de la biomasa que se podría obtener a precios competitivos, por debajo de 50 €/t puesta en fabrica.

El mayor porcentaje de biomasa, un 44,9%, se obtendría (si todo el material se destinase a uso energético) a un coste de entre 76 y 100 €/t de astilla puesta en planta (entre 71 y 90 para el material triturado), y un 32,8% del material superaría esos costes. En caso de aprovecharse la madera gruesa en la industria, esos porcentajes ascenderían, respectivamente, al 43,6 y el 43,4% del total.

MASAS ARBOLADAS CON MAS DEL 50% FCC Y NECESIDAD DE TRATAMIENTO, APROVECHAMIENTO CON DESBROCE	Pendiente, forma de ejecución	Aprovechamiento solo de biomasa				Aprovechamiento de biomasa y madera (fustes de las cortas de regeneración)			
		t/año al 30% p<48- 50€	t/año al 30% p=51- 75% €	t/año al 30% p=76- 100 €	t/año al 30% p>100 €	t/año al 30% p<48- 50€ sin madera de cor- tas reg fustal	t/año al 30% p=51- 75€ sin madera de cor- tas reg fustal	t/año al 30% p=76-100 € sin madera de cor- tas reg fustal	t/año al 30% p>100 € sin madera de cor- tas reg fustal
MONTE BRAVO DENSO – CLAREO MUY INTENSO – 55 tv/ha (43,2 t al 30%/ha)	<25% (50% multitaladora, 50% otras)	----	----	----	783,4	----	----	----	783,4
	25-40%	----	----	----	88,1	----	----	----	88,1
LATIZAL CLARA 13 tv/ha (10,2 t al 30% por ha)	<25% (50% multitaladora, 50% otras)	----	----	----	381,3	----	----	----	381,4
	25-40%	----	----	----	52,4	----	----	----	52,4
FUSTAL CLARA 23,6 tv/ha (18,5 t al 30% por ha)	<25%	----	----	1.032,9	---	----	----	1.032,9	----
	25-40%	----	----	----	221,5	----	----	----	221,5
FUSTAL MADURO NO DENSO REGENERACION 27 tv/ha, total (21,2 t al 30%/ha)	<25% todo biomasa	----	----	1.131,4	----	----	----	----	----
	25-40% todo biomasa	----	----	----	242,7	----	----	----	----
FUSTAL MADURO NO DENSO REGENERACION, residuos (12 tv/ha, 9,4 t al 30% por ha)	<25% madera+ biomasa	----	----	----	----	----	----	501,7	----
	25-40% madera+biomasa	----	----	----	----	----	----	----	107,6
FUSTAL MADURO DENSO REGENERACION 49 tv/ha, total (38,5 t al 30% por ha)	<25% todo biomasa	----	1.205,9	----	----	----	----	----	----
	25-40% todo biomasa	----	----	258,6	----	----	----	----	----
FUSTAL MADURO DENSO REGENERACION, residuos 20 tv/ha (15,7 t al 30% por ha)	<25% madera+ biomasa	----	----	----	----	----	491,8	----	----
	25-40% madera+biomasa	----	----	----	----	----	----	105,6	----
TOTAL t AL 30% SEGÚN PRECIOS (Y POSIBLE APROVECHAMIENTO DE MADERA EN CORTAS DE REG. DE FUSTAL)		0,0	1.205,9	2.422,9	1.769,4	0,0	491,8	1.640,2	1.634,4
TOTAL %		0,0	22,3	44,9	32,8	0,0	13,0	43,6	43,4

Tabla 20. Distribución de la biomasa potencial arbórea por costes unitarios en planta, en función de que la madera más gruesa se utilice o no para uso energético, en caso de llevarse a cabo desbroces preventivos de incendios simultáneamente a los tratamientos selvícolas.

3.12 RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La superficie inventariada en 2012 y 2013 de los montes de los Términos Municipales de Enguera y Moixent es de 17.898 ha, de las cuales solo presentan arbolado con un grado de cobertura superior al 50% 4.009 ha. El resto del Macizo del Caroig, que se ha estudiado mediante un inventario LIDAR que se ha interpretado empleando los resultados del citado inventario. La suma de toda la superficie forestal estudiada en el macizo tiene una extensión de 126.126 ha, de las cuales presentan arbolado con más del 50% de cobertura 7.338 ha. Sobre estas masas arboladas, se han propuesto los siguientes tratamientos:

- Montes bravos post-incendio densos y con altura igual o superior a 4 m: clareos mixtos (sistemáticos y selectivos) que dan lugar, como media, a 55 toneladas verdes – al 45% de humedad – aprovechables por hectárea.

- Latizales y fustales jóvenes y densos (con alta cobertura y un índice de densidad elevado): claras selectivas por lo bajo con extracción de un 35% de los árboles, dando lugar a 13 toneladas húmedas de biomasa por hectárea en las masas más jóvenes (latizal) y 24 toneladas húmedas de biomasa por hectárea en masas no tan jóvenes (fustal).
- Fustales maduros de densidad media y media/alta: cortas de regeneración por aclareo con criterio de selección positivo, en un primer paso hasta 100 p/ha, darían en fustales menos densos 27 toneladas verdes por hectárea, y en las masas más densas, 49 toneladas verdes por hectárea.

Estos tratamientos serían poco relevantes desde el punto de vista de prevención de incendios, al no cambiar el modelo de combustible, salvo que se acompañaran de desbroces de matorral, muy abundante en todos los estratos.

De las masas citadas, se han considerado aprovechables las de menos del 40% de pendiente media, y se han definido dos intervalos de pendiente, de 0 a 25% y de 25 a 40%, a efectos de definir los sistemas óptimos de aprovechamiento en cada caso.

Valorando las producciones en los próximos 15 años, de acuerdo con los datos inventariales, y los costes unitarios de los distintos sistemas de aprovechamiento, se ha llegado a que la posibilidad máxima de biomasa arbórea, a cualquier coste y sin producción de madera, sería de 6.870 toneladas verdes al año (5.398 a la humedad de consumo del 30%), procedentes del tratamiento de 232,0 hectáreas/año. Si se aprovecharan los fustes de las cortas de regeneración para madera, la posibilidad pasaría a ser de 4.335,5 t/año al 45% de humedad (3.766,4 t al 30%) para uso energético.

Si se tienen en cuenta los costes de extracción y la posibilidad de que los fustes en las cortas de regeneración se destinasen a madera en vez de a uso energético, se tendrían las siguientes posibilidades anuales para cada intervalo de costes medios unitarios (por tonelada de astilla o material triturado puesto en planta y a la humedad de consumo del 30%) (tabla 21):

- <50 €/t de astilla (<48 €/t de material triturado) en planta a H:30%: 2.596 t/año que suponen el 48,1% del total (494,71 t/año: 13,1% del total si se aprovecharan los fustes de las cortas de regeneración para madera y sólo los residuos para uso energético)
- 51-75 €/t de astilla en planta a H: 30%, 49-70€/t en el triturado: 1.687,8 t/año que suponen el 31,2% (2.163,87t/año: 57,3% si de las cortas de regeneración se aprovecharan sólo los residuos de cortas de regeneración para uso energético)
- 76-100 €/t de astilla en planta a H: 30%, 71-90 €/t en el triturado que suponen el 11,8% del total 634,8 t/año aprovechando sólo los residuos, 16,9% del total.
- >100 €/t de astilla a H: 30% (>90€/t de material triturado) que suponen el 8,9% del total: 479,8 t/año si se aprovechan sólo los residuos, 12,7 % del total.

COSTE	TONELADAS [H:30%]	
	Sólo aprovechamiento energético	Aprovechamiento combinado con el de madera
<48 €/t	2.596,0	494,71
49-70 €/t	1.687,8	2.163,87
71-90 €/t	634,8	638,21
> 90 €/t	479,8	479,60

Tabla 21. Posibilidades anuales para cada intervalo de costes medios unitarios

La biomasa a costes competitivos procedería en su mayoría de la madera de fustes de los árboles de mayor tamaño (especialmente, los procedentes de las cortas de regeneración en las masas más densas), resultando la biomasa más

para la procedente de los clareos en masas espesas de monte bravo post-incendio, a pesar de proponerse su ejecución solo si las masas superasen los 4 m de altura media y los 2.000 pies/ha.

Si además se tienen en cuenta los costes de los desbroces preventivos de incendios bajo las masas arboladas, que se llevarían a cabo una sola vez a lo largo de la aplicación del plan de gestión (en 15 años), coincidiendo con las intervenciones selvícolas, si no se recogiese la biomasa del matorral – dado su elevado coste y mala calidad, de acuerdo con numerosas experiencias – y se repercutiesen los costes del desbroce en la biomasa de origen arbóreo, los porcentajes de producción estimados para los mismos intervalos de costes serían los siguientes (Tabla 22):

- <50 €/t de astilla (<48 €/t de material triturado) en planta al 30%: 0 t/año
- 51-75 €/t de astilla en planta (al 30%), 49-70 en el triturado: 1.205,9 t/año – 22,3% - (492,2 t – 13,2% - si de las cortas de regeneración se aprovecharan sólo los residuos de cortas de regeneración para uso energético)
- 76-100 €/t de astilla en planta (al 30%), 71-90 en el triturado: 2.422,9 t/año – 44,9% - (1.640,2 t – 43,6% - si de las cortas de regeneración se aprovecharan sólo los residuos de cortas de regeneración para uso energético)
- >100 €/t de astilla (>90 de material triturado): 1.769,4 t/año – 32,8% - (1.634,3 t – 43,4% - si de las cortas de regeneración se aprovecharan sólo los residuos de cortas de regeneración para uso energético)

COSTE	TONELADAS [H:30%]	
	Sólo aprovechamiento energético	Aprovechamiento combinado con el de madera
<48 €/t	0	0
49-70 €/t	1.205,9	492,2
71-90 €/t	2.422,9	1.640,2
> 90€/t	1.769,4	1.634,3

Tabla 22. Posibilidades anuales para cada intervalo de costes medios unitarios teniendo en cuenta los costes de los desbroces preventivos de incendios

Se puede deducir de esas cifras que la posibilidad en biomasa de calidad y a un coste total en planta competitivo es bastante reducida en las masas estudiadas en el macizo del Caroig (unas 2.600 t año, frente a unas 75.000 t que serían necesarias para abastecer una planta de tamaño competitivo), y esta disponibilidad desaparecería si se quisiera correr con los costes de tratamientos preventivos de incendios (desbroces) que modificarían los modelos de combustible en las zonas arboladas, incluso con una frecuencia tan reducida como una vez en 15 años del periodo de aplicación del plan de gestión.

Se han evaluado, paralelamente, los costes de tratamientos en infraestructuras lineales de defensa, que supondrían un coste estimado en los montes estudiados de 4,6 millones de euros si se emplease en su diseño la metodología difusa *fuzzy* propuesta por el Laboratorio del Fuego del INIA, suponiendo un ahorro de 3,9 millones de euros con respecto al diseño según los criterios tradicionales. En cualquier caso, estos trabajos preventivos o de apoyo a la extinción no darían lugar a biomasa de calidad a costes competitivos y tampoco podrían ser financiados por los aprovechamientos de biomasa forestal, debiendo costearlos la propiedad municipal o los responsables de la gestión (Administración Forestal).

4

- Evaluación de la eficacia para la prevención de incendios del aprovechamiento energético de la biomasa forestal

4. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA FORESTAL

La gestión de los combustibles tiene como objetivo reducir la biomasa mediante una gestión preventiva que modifica las características de inflamabilidad y combustibilidad de la masa forestal, su continuidad vertical y horizontal, carga, tamaño, compactación y humedad, así como el tipo de especie cuando esto sea posible, con el fin de disminuir el riesgo de incendio (Stephens y Moghaddas, 2005).

La aplicación de los diferentes métodos de control de combustible puede aplicarse a nivel superficial, gestionando áreas en el interior del monte donde se quiere reducir la carga y modificar la estructura de los combustibles. Por otro lado las labores preventivas se centran también en la creación y mantenimiento de redes cortafuegos, cuyo objetivo es servir de apoyo al dispositivo de extinción, ofreciendo infraestructuras lineales seguras y en donde se pueden establecer oportunidades para controlar los frentes de llama durante un incendio forestal. Estas áreas son superficies relativamente anchas en las que la vegetación natural, densa y muy inflamable, se modifica para conseguir otra vegetación de menor biomasa o menos inflamable, con el fin de que se detengan los fuegos de suelo que lleguen hasta ella o puedan controlarse más fácilmente, sirviendo de base para establecer líneas de defensa (Duralde *et al.*, 2012).

Se plantea la posibilidad de aprovechar con fines energéticos los productos resultantes de los tratamientos necesarios para la formación y mejora de las masas (clareos, podas, resalveos, trasmoches...) que tradicionalmente no han sido rentables. Estos tratamientos ayudarán al desarrollo de la masa y a fomentar la protección contra plagas, enfermedades e incendios forestales. Lógicamente el aprovechamiento de fustales maduros con diámetros grandes (mayores de 35 cm) que son rentables para la industria maderera son también rentables para su aprovechamiento energético.

El problema en muchas zonas mediterráneas con crecimientos bajos, fuertes pendientes (dificultad de mecanización) y escasez de mercado de madera es que estos aprovechamientos han dejado de ser rentables. La biomasa sería una alternativa comercial para los excedentes de madera en pie que tienen muchos montes actualmente sin explotación. Se está planteando en diversos foros que el impulso de estos aprovechamientos supondría además una mejora de la prevención de incendios por disminución de la biomasa existente. Lo cierto es que **esta hipótesis está sin contrastar en tanto que existen dudas sobre qué intensidad deben tener los tratamientos o si sólo la extracción de arbolado sería suficiente para prevenir incendios, al menos la disminución del peligro de incendios de copa.**

Los tratamientos selvícolas propuestos en el punto 3 para aprovechar la biomasa con fines energéticos se resumen de forma esquemática en la Tabla 23:

Para masas de regenerado y monte bravo se aplicarían clareos sistemáticos o semiselectivos, donde se estima conveniente extraer, como media, un 75% del número de pies de forma sistemática. Si la masa arbolada se encuentra en estado de latizal se pueden aplicar diferentes tratamientos en función de la densidad. En el caso de la zona ámbito de estudio, las masas en estado de latizal no cuentan con una densidad muy elevada (250-300 pies/ha), por lo que es recomendable posponer la extracción o aplicar un porcentaje bajo (10%) como medida sanitaria. También es aconsejable aplicar desbroces y labores de eliminación o tratamiento de todos los restos de desrame y descope producidos en las operaciones selvícolas. Si la masa arbolada está en estado de fustal se pueden aplicar cortas de regeneración mediante aclareo sucesivo en 2 ó 3 pasos dependiendo de la espesura, calidad de estación y matorral, aunque esta clase natural de edad no está muy presente en la zona. (ver capítulo 3)

Repoblado ¹ o monte bravo ² post-incendio	Clareo sistemático o semiselectivo		
Parcelas de estructura "regular"	Latizal ³	Densidad elevada	Claras fuertes o moderadas según calidad de estación y matorral. Posibles desbroces
		Densidad no elevada	Esperar / posibles desbroces
	Fustal ⁴	Cortas de regeneración	Aclareo sucesivo en 2 ó 3 pasos dependiendo de espesura, calidad de estación y matorral. Poda alta, desbroce puntual o generalizado

Tabla 23. Esquema de los tratamientos propuestos para los pinares de *Pinus halepensis* en las comarcas de Enguera, Moixent y el Macizo de Caroig (Tolosana, 2013).

Para el resto de zonas de pasto, matorral y pasto - matorral, se recomienda la aplicación de desbroces, ya sean de forma manual con moto-desbrozadora; desbroce mecanizado con tractor de cadenas y desbrozadora; desbroce por quema prescrita. En las zonas donde sea adecuada su aplicación por presencia de cabaña ganadera o reintroducción de este aprovechamiento se está proponiendo el control de biomasa arbustiva mediante ganadería extensiva. Podría tener aplicación más directa al mantenimiento de áreas cortafuegos tras realizar el primer desbroce o quema prescrita.

El uso de los simuladores de incendios aplicados a la evaluación de tratamientos selvícolas pretende cuantificar las diferencias existentes en el comportamiento del fuego entre la masa actual y la masa después de aplicar una serie de tratamientos selvícolas. Los factores a modificar son el tipo de modelo de combustible y por tanto: los valores de la carga de combustible según el tiempo de retardo (1 hora, 10 horas y 100 horas), cantidad de combustible vivo y muerto, altura de la primera rama viva (CBH, m), Fracción de Cobertura Cubierta arbolada y/o Cobertura de matorral (FCC, %) y Densidad Aparente de las copas (CBD, kg/m³).

Los fundamentos de intervenciones preventivas en las masas forestales para alterar el comportamiento del fuego (Agee *et al.*, 2000) han subrayado la necesidad de afectar con ellos a la estructura completa del complejo de combustibles. Aunque la mayoría de los estudios sobre esta temática en ecosistemas forestales norteamericanos han evidenciado una reducción en la posibilidad de inicio y propagación de fuego de copa (Stephens y Moghaddas, 2005), otros han mostrado dudas sobre su eficacia, si no se realizan simultáneamente tratamientos de los combustibles de superficie (Stephens, 1998, Molina *et al.* 2006).

4.1 MODELOS DE COMBUSTIBLE EN LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1 Localización

Los modelos de combustible presentes en la zona de estudio según la clasificación del Consorcio de Bomberos de Valencia se detallan en la Tabla 24. Para el estudio en el monte de Enguera se han considerado los modelos correspondientes del sistema BEHAVE aplicados al área de trabajo.

	Modelos de combustible	Superficie (ha)	% de superficie
Pastizal	P1	179,77	0,14
	P2	88,70	0,07
	P3	116,81	0,09
Pastizal- matorral	PM1	4.823,36	3,69
	PM2	650,31	0,50
Matorral	M1	207,23	0,16
	M2	40.209,49	30,80
	M3	2.357,89	1,81
Matorral bajo arbolado	MA1	10.505,29	8,05
	MA2	26.892,36	20,60
	MA3	20.940,41	16,04
	MA4	739,43	0,57
Hojarasca bajo arbolado	HA	6,92	0,01
No combustibles	Artificial	607,72	0,47
	Agrícola	20.410,75	15,64
	Arena	10,83	0,01
	Agua	1.252,24	0,96
	Minas	75,24	0,06
	Ribera	16,43	0,01
	Vías 1	51,12	0,04
	Vías 2	398,06	0,30
	Zonas verdes	1,32	0,00

Tabla 24. Superficie ocupada por cada modelo de combustible y su porcentaje respecto a la superficie total de la zona de estudio.

4.1.2 Régimen de incendios

La estadística de incendios forestales de la demarcación, para el periodo 1969-2012, refleja que el 75% de las incidencias corresponde a conatos (incendios menores de 1 ha). En cuanto a la superficie afectada por incendios forestales, cabe destacar que la mayor parte de ésta corresponde a unos pocos incendios mayores de 500 hectáreas denominados Grandes Incendios Forestales (GIF).

Teniendo en cuenta las superficies quemadas que se encuentran dentro de la delimitación del área de interés, el fuego habría recorrido más del 100% de la superficie, y aunque no quiere decir que se haya quemado toda su extensión, existen zonas que han sido incendiadas varias veces, lo que da una idea de recurrencia de incendios en algunas zonas (Tabla 25). Como se observa en la Figura 25, en la parte noreste, se han ocasionado varios grandes incendios.

Como se puede observar en la Figura 25 la zona de Enguera sufrió varios grandes incendios en el período estudiado, con lo que el área de arbolado maduro sin quemar está restringido fundamentalmente al monte V072.

Año	Número	Superficie (Ha)	Año	Número	Superficie (Ha)
1969	1	671,29	2001	35	40,85
1979	1	38.901,13	2002	17	5,23
1985	4	22.501,48	2003	28	19,64
1993	15	10.120,54	2004	27	9,74
1994	18	50.047,45	2005	37	11,89
1995	8	74,60	2006	22	35,78
1996	18	273,54	2007	7	1,67
1997	16	5,16	2008	18	79,15

Año	Número	Superficie (Ha)	Año	Número	Superficie (Ha)
1998	29	30,46	2009	31	13,42
1999	32	3.193,42	2010	15	3,27
2000	18	222,39	2012	1	26.328,66

Tabla 25. Superficie (ha) y número de incendios forestales por año en el macizo de Caroig.

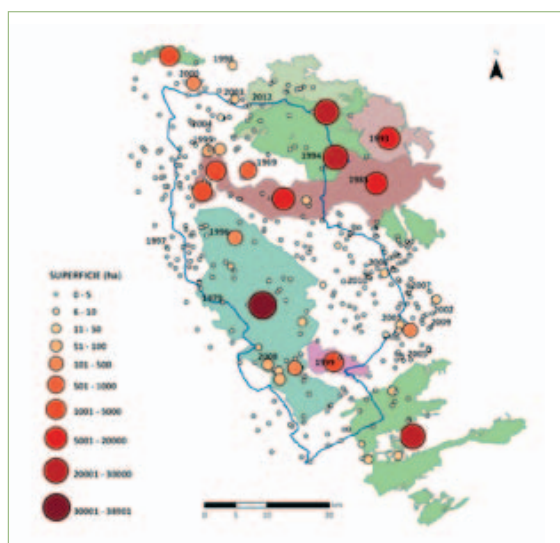


Figura 25. Régimen de incendios en el macizo de Caroig. Se indican el número total de incendios y la superficie afectada en el período considerado (1969-2012). Se indica con círculo el área ocupada por los montes de Enguera.

4.1.3 Plan de prevención de incendios

La totalidad de los terrenos forestales de la Comunidad Valenciana tienen la consideración de “zonas de alto riesgo de incendios forestales” según la resolución de 19 de julio de 2005, (DOGV 5062/2005).

En lo referente a la gestión forestal, la Comunidad Valenciana está dividida en once demarcaciones, según la ley forestal de la Generalitat Valenciana, (BOE 3/1993). El macizo de Caroig es un área comprendida entre las demarcaciones de Xàtiva, Requena y Lliria de alto interés para el proyecto, debido a que presenta gran cantidad de superficie forestal sin explotación que se considera interesante para su aprovechamiento energético. Se dispone del Plan de Prevención de Incendios Forestales de la Demarcación de Xàtiva, (Generalitat Valenciana, 2009). El objeto general del plan es minimizar el número de incendios forestales, así como la superficie afectada por incendios en caso de producirse. El ámbito territorial de aplicación del plan son aquellos terrenos forestales incluidos en la demarcación forestal de Xàtiva y aquellos terrenos lindantes al forestal sobre los cuales la normativa vigente o el propio plan establezcan medidas de prevención. Las demarcaciones colindantes, Requena y Lliria, no disponen de plan propio, por lo que el Plan de Xàtiva se va a hacer extensivo a toda la delimitación del macizo de Caroig (Figura 26).



Figura 26. Demarcaciones forestales de la Comunidad Valenciana.

La probabilidad de que se produzca un GIF aumenta cuando se dan condiciones meteorológicas adversas (que pueden concretarse fundamentalmente en: alta temperatura, baja humedad relativa y alta velocidad del viento), además, la peligrosidad del incendio viene determinada por las características topográficas de la zona, así como por las características del combustible.

Tanto la acumulación de biomasa como la desaparición de zonas de discontinuidad suponen un cambio en la estructura de los sistemas forestales que provoca un aumento de la peligrosidad de los incendios, superando en ocasiones la capacidad de los medios de extinción para controlar el incendio. Ante esta problemática, dentro de las líneas de actuación que forman parte de este plan, está la construcción o conservación de Áreas Cortafuegos.

El dimensionamiento de los elementos de ruptura se hace en función de la longitud de llama prevista, de acuerdo con los modelos de combustible presentes en cada zona y para unas condiciones meteorológicas características en los días de máximo riesgo.

4.2 SIMULACIONES DE GRANDES INCENDIOS CON FARSITE Y FLAMMAP

El simulador elegido para la realización de este trabajo es FARSITE debido a la cantidad de bibliografía existente y su accesibilidad (www.fire.org), así como su flexibilidad para estudios a escala paisaje. Para el caso del monte V072 de Enguera se realizó un estudio más exhaustivo con FLAMMAP, otro de los programas de la familia *fire.org* que permite además optimizar tratamientos preventivos y simular vientos locales, con lo que es más apropiado para estudios a escala monte.

4.2.1 Generación de puntos de inicio de incendios

Se determinó realizar un número total de 40 simulaciones en el área de estudio para tener una muestra representativa del comportamiento del fuego en el territorio. No son puntos de ignición colocados al azar ya que se contaba con el riesgo de que esos puntos no demuestran la realidad que se quiere observar. Los puntos se establecieron de manera estratificada ponderando el número de igniciones en cada modelo de combustible en función de la superficie que ocupan los diferentes tipos de modelos de combustible. Los puntos se concentraron mayoritariamente en el extremo Oeste de la zona de estudio, debido a los vientos dominantes en condiciones de disponibilidad de los combustibles para arder son procedentes del-Oeste (vientos terrales muy secos procedentes del Sistema Ibérico). Este vector de viento dominante es el que se utiliza en las simulaciones, y la ubicación de puntos de ignición en la zona Oeste permite asegurar que el perímetro del área incendiada no exceda los límites del macizo de Caroig (Figura 27).

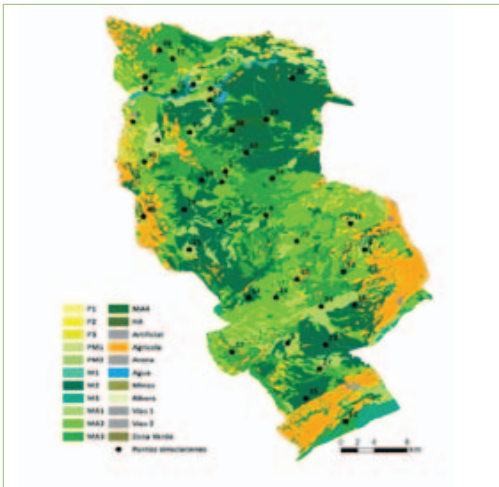


Figura 27. Puntos creados para la realización de las simulaciones localizados en el Macizo de Caroig.

En la zona de las simulaciones 10 y 24 se encuentra el monte V072 de Enguera, donde se repitió la simulación con FLAMMAP modificando el escenario con datos más precisos del área de estudio.

4.2.2 Fuentes de datos, información geográfica y variables consideradas

Las simulaciones en FARSITE YFLAMMAP (Figura 28) requieren un conjunto de información espacial de los principales factores que afectan al comportamiento del fuego: topografía, vegetación y meteorología. Todas las capas de entrada se introducen en formato ASCII con igual extensión, sistema de coordenadas y tamaño de celda. Para este proyecto se adopta 30 m de tamaño de celda para el macizo de Caroig y 10 m para el monte V072 de Enguera, sistema de coordenadas ETRS_1989_UTM_Zone_30N. Este apartado se detalla en función de los datos de entrada, ajustes del programa y datos de salida que aporta FARSITE y FLAMMAP.

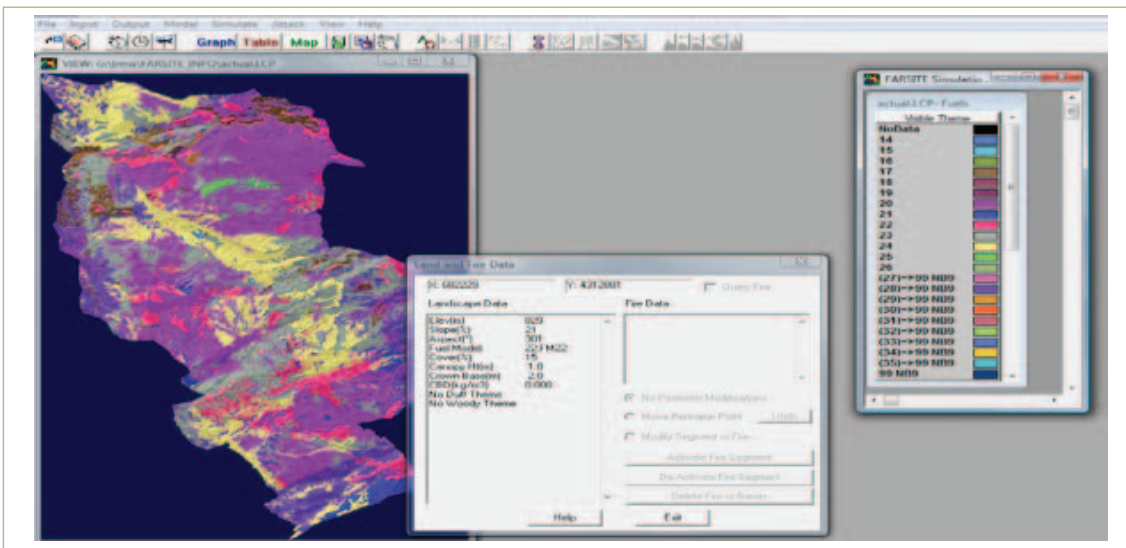


Figura 28. Ventana de FARSITE.

4.2.2.1 Datos de entrada (*inputs*)

Para la correcta realización de las simulaciones, FARSITE necesita una serie de información que coincide con los tres factores que forman el triángulo del fuego (topografía, combustibles y meteorología).

1. Elevación

La capa de *elevation* o **elevación**, expresada en metros, proviene de la página del IGN (Instituto Geográfico Nacional). Se obtuvo mediante sensores LIDAR con una densidad media de 0,5 puntos/m². Su resolución es de 5 m, (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do>).

2. Pendientes y Orientaciones

La capa de *slope* o **pendientes** (%) y *aspect* u **orientaciones** (grados) son derivadas de la capa de elevaciones, elaboradas mediante procesos *Slope* y *Aspect*, realizados en ArcGIS 10.

3. Modelos de combustible

La capa de *fuel model* o **modelos de combustible** para Caroig fue proporcionada por el Consorcio de Bomberos de Valencia. Los parámetros que caracterizan los modelos de combustible se personalizan con la herramienta NWMDL de BehavePlus® (www.fire.org) ya que no coinciden con ninguno de los modelos, Rothermel o Scott y Burgan, con los que trabaja FARSITE por defecto.

En el caso de Enguera se generó una capa de modelos de combustible siguiendo la clasificación de los modelos estándar del sistema BEHAVE mediante la interpolación (técnica *Nearest neighbour*) de los datos de inventario de matorral aportados en el proyecto de ordenación (Figura 29).

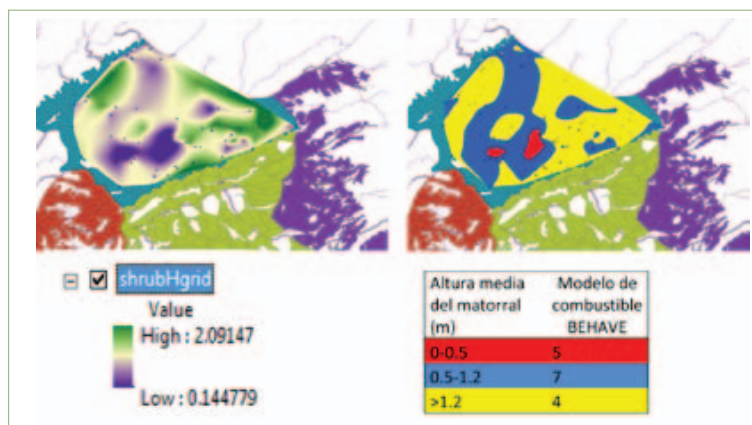


Figura 29. Modelos de combustible obtenidos de los inventarios de campo (parcelas proyecto LIFE). A la izquierda interpolación (método del vecino más próximo). A la derecha reclasificación en tres modelos de matorral según el sistema BEHAVE.

4. Cubierta vegetal

La información que contiene la *capa canopy cover* o **cubierta vegetal** en % y *stand height* o **alturas** es información obtenida del proyecto LIFE+, procedente de datos LIDAR derivados de los vuelos LIDAR del PNOA con una resolución de 0,5 puntos/m².

La capa **cubierta vegetal** que corresponde con la FCC (Fracción de cubida cubierta %) y la de alturas (m), se refieren solo a masas arboladas, por lo que solo es para los modelos MA1, MA2, MA3, MA4 y HA (ver Tablas 1 y 24). Estos modelos se tratan como capas separadas mediante la herramienta *Extract by Mask*. El resto de modelos contiene valor 0.

Para poder ordenar y sistematizar el proceso, se realiza un modelo con la herramienta *Model Builder* en ArcGIS 10 con el fin de obtener la capa de cubiertas vegetales en porcentaje y convertida a formato ASCII (Figura 30).



Figura 30. Model Builder elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de cubierta vegetal.

5. Altura de arbolado

Se realiza también un *Model Builder* en ArcGIS 10 con el fin de obtener la capa de alturas, en metros, en números enteros multiplicados por 10, para poder considerar los decimales y convertida a formato ASCII (Figura 31). Se considera que la masa está dominada por *Pinus halepensis* (pino carrasco) en diversas clases naturales de edad (regenerado, monte bravo, latizal o fustal). La mayoría de la superficie afectada por incendios presentan masas en estado de regenerado, monte bravo con mezcla de matorral (modelos de combustible MA1, MA2, MA3). En el caso en que el pino no haya regenerado las áreas han sido ocupadas por matorral o mezclas de matorral y pasto (modelos PM y M). Las áreas no afectadas por grandes incendios presentan latizales y fustales de diversas densidades y alturas casi siempre con matorral bajo copas (modelo MA4) y ocasionalmente sin matorral (modelo HA).

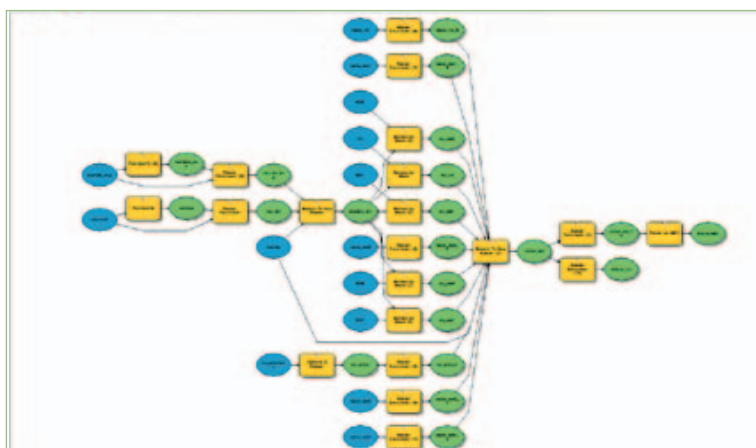


Figura 31. Model Builder elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de alturas.

6. Altura desde superficie del suelo hasta primera rama viva

Crown Base Height (CBH) es la altura desde la superficie del suelo hasta la primera rama viva en metros. Según los datos observados en el inventario de campo se puede considerar constante y se asignará una altura media de 2 metros. Este dato coincide con las estimaciones realizadas por diversos modelos de árbol individual que consideran que CBH es aproximadamente 1/5 de la altura (2 m para árboles de 10 m, que son alturas frecuentes en la zona).

7. Densidad aparente

Para calcular la capa de *Crown Bulk Density (CBD)* o **densidad aparente de las copas**, se necesita la capa de alturas, anteriormente calculada. Con los datos de inventario de campo se establece un ajuste de regresión entre las alturas y los diámetros de la masa (Figura 32).

El modelo que mejor representa esta relación es la función exponencial (Figura 32):

$$y = 5,3487e^{0,1324x}$$

Con ($R^2=0,52$), siendo: y = diámetro normal (cm), x = altura (m)

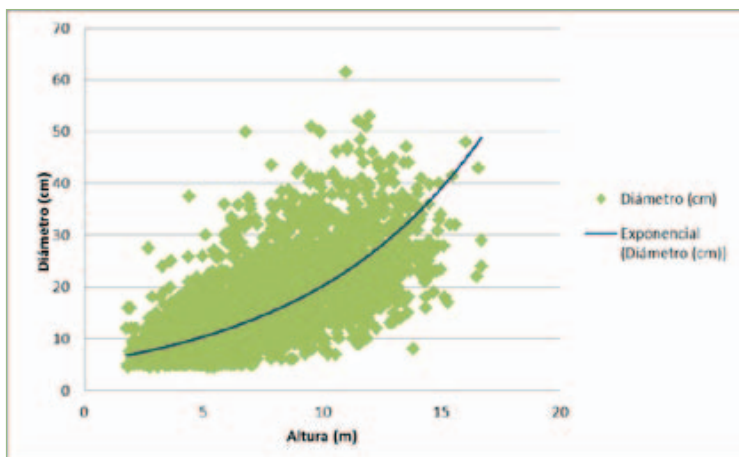


Figura 32. Relación exponencial existente entre los datos de altura y diámetro.

Una vez que se expresan los diámetros en función de las alturas, y con la información recogida en la monografía nº 13 del INIA se pueden aplicar funciones de regresión que relacionan el peso seco de las diferentes fracciones de copa (kg) con su diámetro normal (cm), (Montero et al., 2005). Para el cálculo de la biomasa se consideran los parámetros para acículas y las ramillas finas, hasta 6 mm de diámetro (1 hora de tiempo de retardo), como combustible arbóreo disponible para el frente de llama. La función exponencial se aplica mediante *Raster Calculator*.

El siguiente paso es calcular los valores de:

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}}$$

donde: CF: Factor de corrección, SEE: error estándar de la estimación (ver valor en Tabla 26)

$$A = e^a$$

a: parámetro a (valor en Tabla 26)

Se calcula la siguiente ecuación, donde el valor de “d” será el ráster de diámetros en función de alturas calculado y “b” el ráster resultado de biomasa (kg). También se realiza mediante *Raster Calculator*.

$$\ln b = a + b \cdot \ln d$$

$$b = CF \cdot A \cdot d^d$$

Y	Parámetros		R ² adj	SEE
	a	b		
Biomasa de ramas de diámetro menor de 2 cm	-2,74498	2,03748	0,953	0,226267

Tabla 26. Parámetros necesarios para el cálculo de la biomasa.

Se realiza un *Model Builder* en ArcGIS 10 para poder ordenar todos los pasos necesarios (Figura 33).

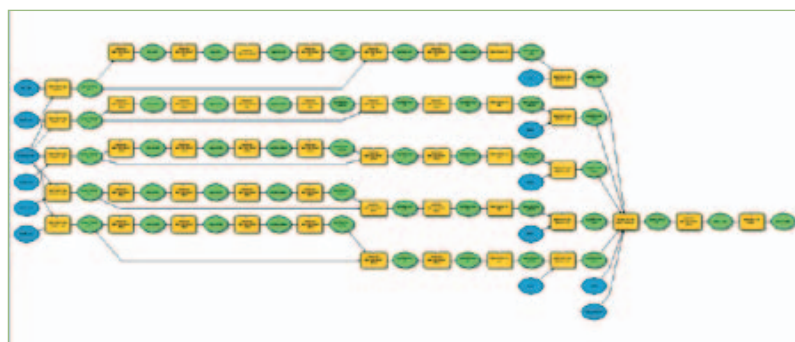


Figura 33. Model Builder elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de densidad aparente.

El volumen de copa se calcula como el volumen de un paralelepípedo de altura igual a la longitud media de copa. La longitud media de copa se calcula como la diferencia entre la altura media de la masa y la altura media de la base de la copa, (Fernández-Alonso et al., 2013). Todas las operaciones son realizadas mediante *Raster Calculator*. Finalmente la densidad aparente se expresa en kg/m³ multiplicado por 100, para considerar los decimales y se convierte a formato ASCII.

En la Figura 34 se puede ver la ventana donde se introducen los archivos de entrada explicados hasta ahora.

Para el caso de la simulación en Enguera con FLAMMAP se disponía de los datos de inventario localizados en las parcelas con lo que se pudieron aplicar directamente alometría para obtener la densidad aparente. Se emplearon los datos de inventario de LIDAR para la altura y se usaron alometría en base a los trabajos de Mitsopoulos y Dimitrakopoulos (2007a y 2007b), y considerando los resultados de los trabajos de Madrigal et al., (2006), Vega et al. (2011) y Jiménez et al. (2013a) en modelización de parámetros de biomasa de copa del género *Pinus* en la península ibérica.

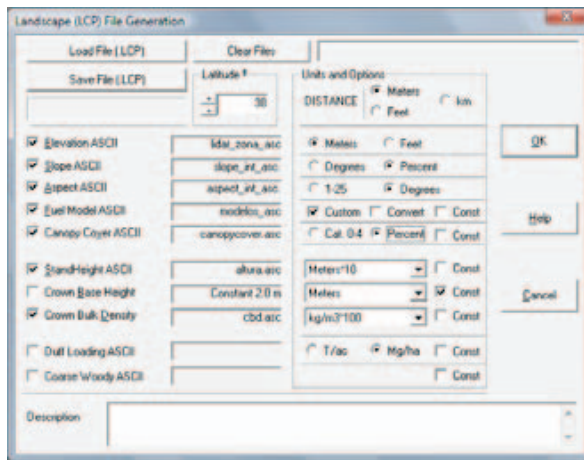


Figura 34. Ventana en la que se introducen los archivos de entrada en formato ASCII para la creación del paisaje.

8. Ajustes

Adjustements o **ajustes**, este factor cambia el valor de la tasa de propagación. Para este proyecto no se requiere este cambio, por lo que su valor es 1.

9. Datos de Humedad de los combustibles

Moistures o **Humedades** para cada modelo (FMC), que en este caso se consideran constantes para todos los modelos simulando una situación meteorológica extrema en la que los combustibles muertos tienen muy baja FMC.

Modelo	1 hora	10 horas	100 horas	Herbáceo	Vivo Leñoso
Todos	3	5	7	5	50

Tabla 27. Datos de la humedad de los combustibles.

10. Personalización de los modelos

En la Tabla 28 se describen los valores de las variables descriptivas de los **modelos de combustible** propuestos por el Consorcio de Bomberos de Valencia. Como FARSITE no dispone por defecto de estos modelos es necesario generarlos manualmente para que el sistema pueda leer los ficheros de combustible y generar el correspondiente archivo de combustibles en formato ASCII.

	1h	10h	100h	Herbáceo	Vivo leñoso	1h SAV	Vivo herbáceo SAV	Vivo leñoso SAV	Espesor capa de combustible	Humedad	Calor (vivo)	Calor (muerto)
	t/acre					1/pie			pie	%	BTU/lb	
P1	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	2750	1800	1500	1,000	14	8000	8000
P2	0,470	0,000	0,000	0,200	0,000	2750	1800	1500	3,000	14	8000	8000
P3	1,700	0,910	0,000	8,210	0,000	1800	1500	1500	10,000	29	8813	8813
PM1	0,680	0,000	0,000	0,940	0,000	1800	1600	1800	2,000	25	8000	8000
PM2	1,720	0,270	0,090	3,080	6,440	1800	1600	1600	5,000	40	8000	8000
M1	0,510	0,410	0,000	0,000	0,840	2000	1800	1500	1,000	20	8813	8813
M2	0,630	0,650	0,000	0,000	1,630	2000	1800	1500	3,000	32	8813	8813

	1h	10h	100h	Herbáceo	Vivo leñoso	1h SAV	Vivo herbáceo SAV	Vivo leñoso SAV	Espe-sor capa de combustible	Hume-dad	Calor (vivo)	Calor (muerto)
	t/acre					1/pie			pie	%	BTU/lb	
M3	0,730	0,880	0,000	0,000	2,490	2000	1800	1500	5,000	40	8000	8000
MA1	1,090	2,070	1,820	1,970	4,560	1750	109	1600	6,000	38	8000	8000
MA2	1,030	1,700	1,370	0,000	0,340	1750	1800	1600	2,000	33	8000	8000
MA3	1,030	1,700	2,720	0,000	0,340	1750	1800	1500	5,000	25	8000	8000
MA4	2,740	1,820	4,540	0,000	1,820	1800	1800	1500	1,000	25	8000	8000
HA	1,360	0,910	2,270	0,000	0,000	2500	1800	1600	1,000	29	8000	8000

Tabla 28. Caracterización modelos de combustible. Se introducen en unidades del sistema anglosajón.

En el caso de Enguera se utilizaron los parámetros de los modelos estándar del sistema BEHAVE para los modelos 4, 5, y 7 que fueron los que se obtuvieron según los inventarios de campo.

11. Meteorología

El escenario meteorológico considerado es el del incendio de Cortés de Pallás (municipio de Valencia) en 2012 suministrado por el Consorcio de Bomberos de Valencia. Este incendio comenzó el 28 de junio de 2012 y afectó a 29.000 ha. La elección se justifica debido a que es un suceso desfavorable en cuanto a temperaturas altas y humedades relativas bajas (figura 35).

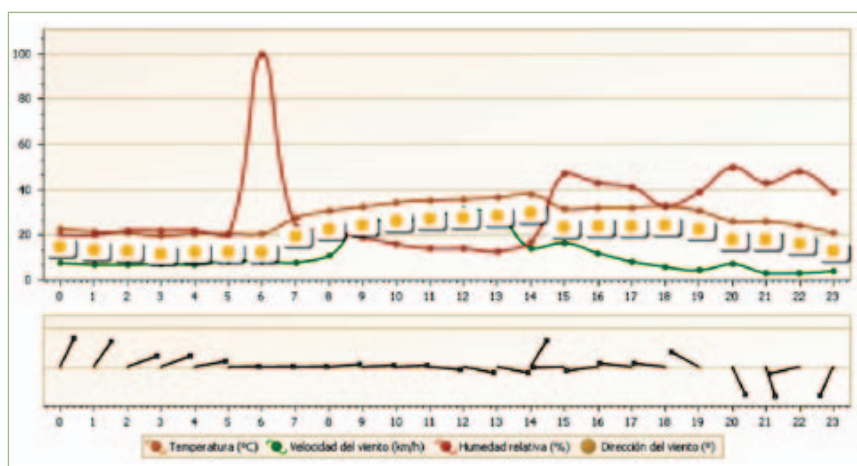


Figura 35. Datos meteorológicos del incendio de Cortés de Pallás utilizados para realizar las simulaciones en el macizo de Caroig

Dentro de las predicciones realizadas por AEMET (Agencia Española de Meteorología) se analiza la tendencia de 2011 a 2040, en la cuadrícula que enmarca la zona de estudio, para comprobar si estas condiciones se van a repetir en el futuro contexto de cambio climático. La Figura 36 muestra un análisis de varianza no paramétrico utilizando el test de Coeficiente de Concordancia de Kendall (*Friedman ANOVA and Kendall Coeff. of Concordance*) de las temperaturas máximas según el modelo de predicción CGCM2 y para el coeficiente de sequía (precipitación/ 2 veces la temperatura) según el modelo ECHAM4, para los meses con más riesgo de incendio: junio, julio y agosto. Analizando el mes de junio, 2012 forma parte de los años con valores más bajos tanto en temperaturas como en niveles de sequía. Por tanto el escenario del 29 de junio del incendio de Cortés de Pallás (ver datos en Figura 35) es un escenario extremo, que con mucha probabilidad se va a volver a repetir incluso se podrían encontrar situaciones más extremas según las predicciones de los modelos climáticos analizados.

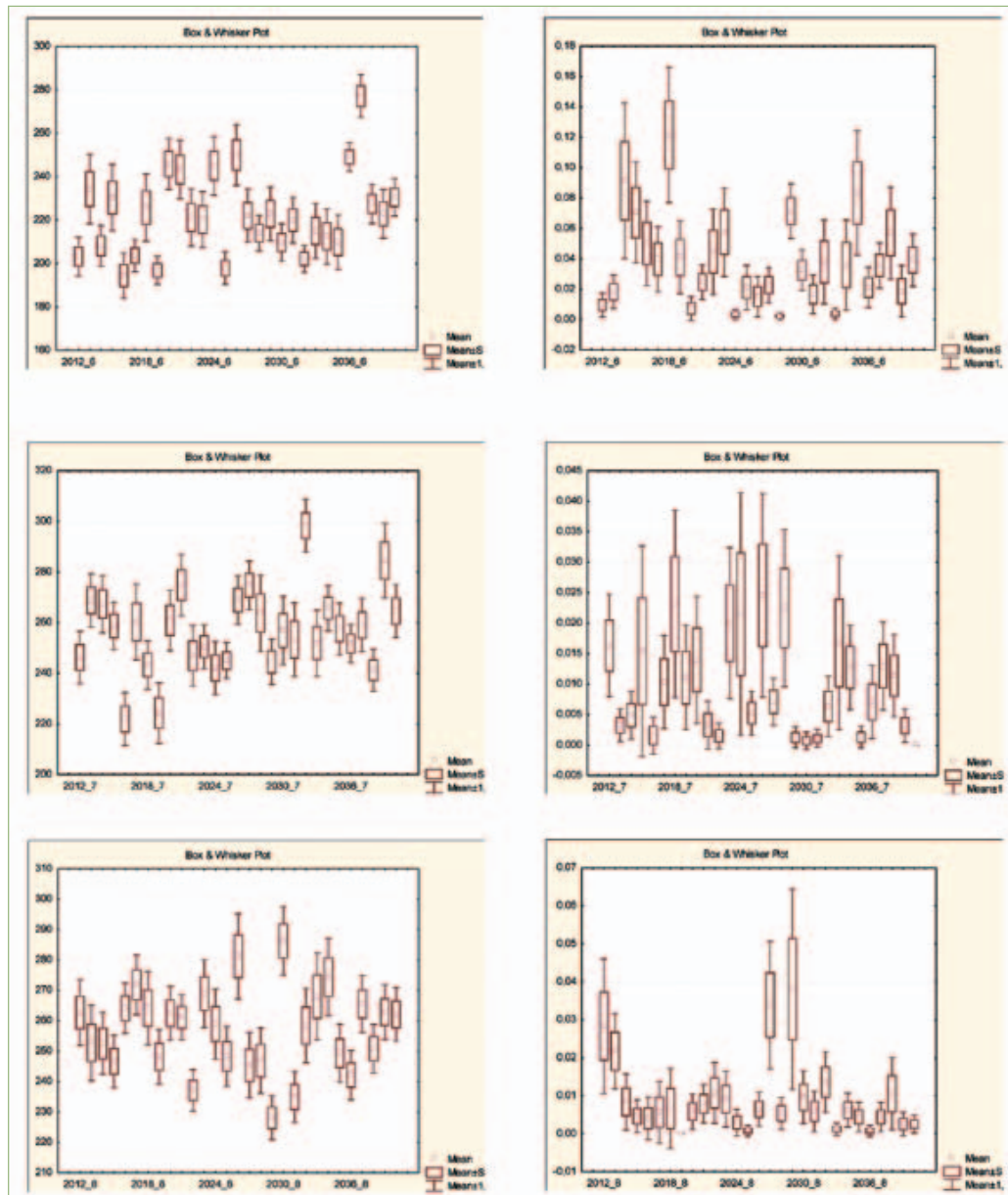


Figura 36. Distintos gráficos que expresan la tendencia global de las temperaturas máximas (izquierda) y del índice de sequía (P/2T, P: Precipitación (mm), T: Temperatura (°C)) (derecha) de 2011 a 2040 para los meses de junio, julio y agosto

El archivo necesario para FARSITE y FLAMMAP necesita datos de: precipitación, hora de la mínima temperatura, hora de la máxima temperatura, temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa mínima, humedad relativa máxima, elevación (Tabla 29).

Día	Precipitación (pulgadas)	Hora (mín)	Hora (máx)	Tª mín. (F)	Tª máx. (F)	Humedad máx (%)	Humedad mín (%)	Elevación (pies)
28/06	0	23:00	16:00	83	98	21	11	1947
29/06	0	3:00	14:00	67	101	50	13	1947

Tabla 29. Datos de meteorología.

Para el caso de la simulación en el monte V072 de Enguera se consideró un escenario en el que se cumplía la “regla del 30” esto es 30% HR, 30 °C de Temperatura y 30 km/h de velocidad de viento, con las humedades prefijadas por FLAMMAP para los modelos 4,5 y 7.

12. Viento

Los datos necesarios para el archivo del viento son: velocidad del viento, dirección y si está nublado o no. Se usaron los datos del incendio de Cortes de Pallás (Tabla 30) donde el viento dominante fue del oeste (270°) con lo que se usó como vector de propagación en las simulaciones FLAMMAP de Enguera.

Hora	Velocidad del viento (km/h)	Dirección (°)	Nublado	Hora	Velocidad del viento (km/h)	Dirección (°)	Nublado
0:00	7,57	206	0	12:00	31,428	280,3	0
1:00	7	215	0	13:00	28,872	280,4	0
2:00	7,05	250	0	14:00	14,328	212,1	0
3:00	7,2	250	0	15:00	16,632	88,1	0
4:00	7	260	0	16:00	12,132	82,8	0
5:00	8,5	270	0	17:00	8,388	95,3	0
6:00	8,5	270	0	18:00	5,904	95,3	0
7:00	8	270	0	19:00	4,428	118	0
8:00	11	266	0	20:00	7,236	334,7	0
9:00	25,92	267,4	0	21:00	3,42	341,5	0
10:00	26,46	267,6	0	22:00	3,24	76,9	0
11:00	27,396	274,8	0	23:00	4,284	23,38	0

Tabla 30. Datos de velocidad del viento y dirección a cada hora.

Tanto el archivo de meteorología como el de viento, necesitan datos del día anterior a la simulación que sirvan de antecedentes y para el cálculo de acondicionamiento de los combustibles muertos.

Para finalizar la creación del proyecto se deben meter los archivos meteorológicos, de viento, los ajustes y personalizaciones necesarias en los modelos de combustible, junto con el paisaje en otra ventana de FARSITE (Figura 37). En la Figura 38 se muestra un resumen de las capas de información geográfica utilizadas como inputs para el caso de Enguera. La estructura para Enguera en las simulaciones FLAMMAP es similar.

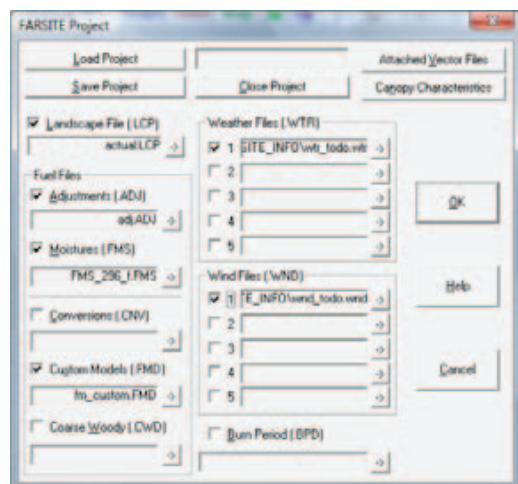


Figura 37. Datos de entrada necesarios para la creación del proyecto.

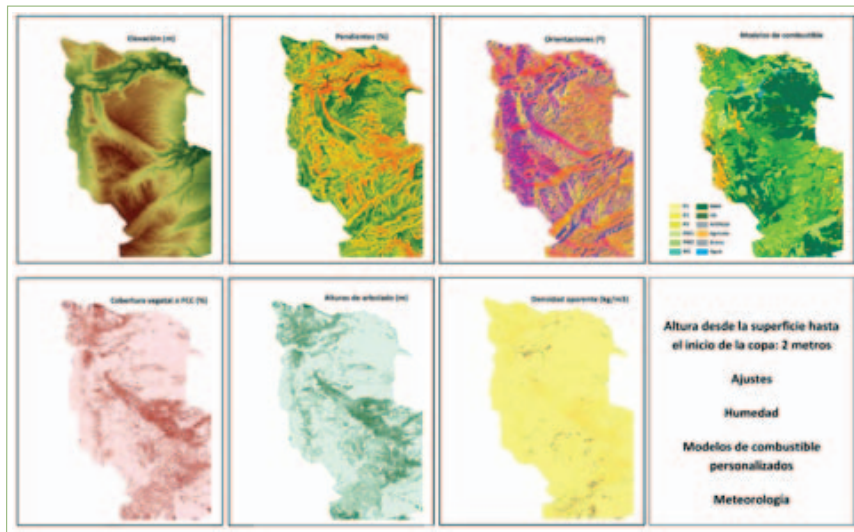


Figura 38. Datos de entrada necesarios para crear el proyecto en FARSITE. Elevación (MDT05 descargado del IGN), Pendientes y Orientaciones (derivados del mapa de elevaciones en ArcGIS 10), Modelos de combustible (Consortio de Bomberos de Valencia), Cobertura vegetal y Altura de arbolado (procedentes de Model Builder Figura 31 con datos LIDAR), Densidad aparente (realizada mediante Model Builder Figura 33 a partir de alturas de arbolado), Altura de la superficie hasta inicio de copa (inventario forestal), Ajustes, Humedad, Personalización Modelos de combustible, Meteorología y Viento (Consortio de Bomberos de Valencia, ficheros FARSITE, elaboración propia)

4.2.2.2 Ajustes

Antes de iniciar la simulación y después de crear el proyecto en FARSITE con todos los datos de entrada, se ajustan los siguientes parámetros:

- **Parámetros:** tiempo en el que se toman los datos de salida. En este caso 30 minutos.
- **Fire behavior Options u opciones de comportamiento del fuego:** conjunto de herramientas para seleccionar el comportamiento del fuego. Para simular el fuego de subida a copas, se selecciona *Link Crown Density & Cover* en la ventana de opciones de comportamiento del fuego de FARSITE (Figura 39).

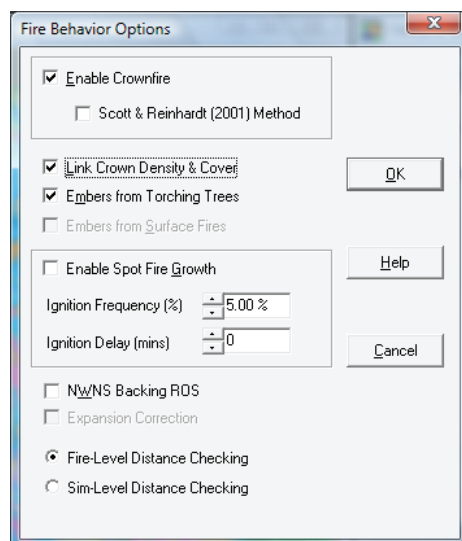


Figura 39. Ventana de FARSITE donde se seleccionan las opciones de comportamiento del fuego.

- **Duración de la simulación:** El escenario tiene una temperatura máxima de 38,11 °C a las 14 horas, a partir de esa hora desciende y tiende a ser constante, por ello se escogió como duración de la simulación, desde 2 horas antes del suceso máximo, 12h, hasta las 18h, en total 6 horas de simulación libre (Figura 40).

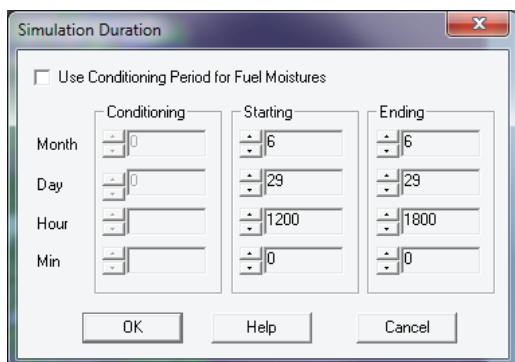


Figura 40. Ventana de FARSITE donde se selecciona la duración de la simulación (mes, día y hora del comienzo y del fin de la simulación).

4.2.2.3 Datos de salida (*outputs*)

Todas las simulaciones realizadas con FARSITE pueden ser exportadas y gestionadas usando un SIG, algunas en formato vectorial y otras en formato ráster. Las salidas que ofrece FARSITE constan de:

- Perímetro del área quemada en formato vectorial.
- Archivos ráster: los archivos ráster se guardan con esas extensiones y para trabajar con los datos, se debe pasar a formato ASCII y a ráster para obtener de cada simulación, la siguiente información detallada en la Tabla 31. En la Figura 41 se observa la ventana de FARSITE en la que se indican los datos que se deseen obtener.

Archivo de salida	Descripción	Extensión	Unidades
Intensidad del frente llama	Velocidad de liberación de la energía producida	.FLI	kW/m
Longitud de llama	Máxima distancia existente entre la base y la punta de la llama	.FML	M
Velocidad de propagación	Velocidad de avance del frente hacia delante, hacia atrás o en los flancos	.ROS	m/min
Calor por unidad de área	Calor generado por unidad de superficie	.HPA	kJ/m ²
Intensidad de reacción	Tasa de energía liberada definida por Rothermel	.RCI	kW/m ²
Subida a copa	Probabilidad de subida a copa según modelo de Van Wagner	.CFR	1= fuego de superficie, 2=pasivo, 3=activo
Tiempo de llegada	Tiempo de llegada de los frentes según los parámetros fijados	.TOA	horas
Dirección de la propagación	Rumbo dominante del frente principal de la propagación	.SDR	0 - 359° Azimuth

Tabla 31. Descripción de los archivos *ráster* de salida con sus extensiones y unidades.

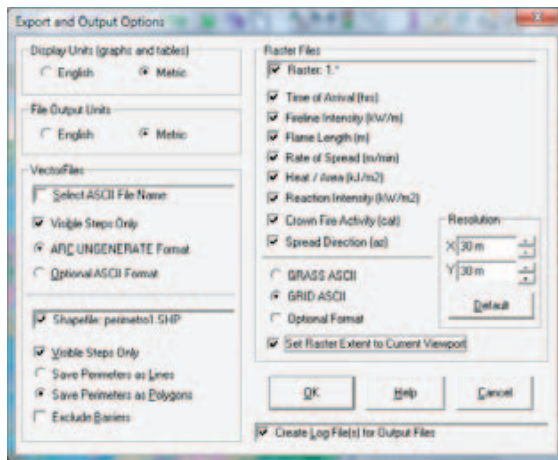


Figura 41. Ventana de FARSITE donde se seleccionan los datos para exportar a ArcGIS 10.

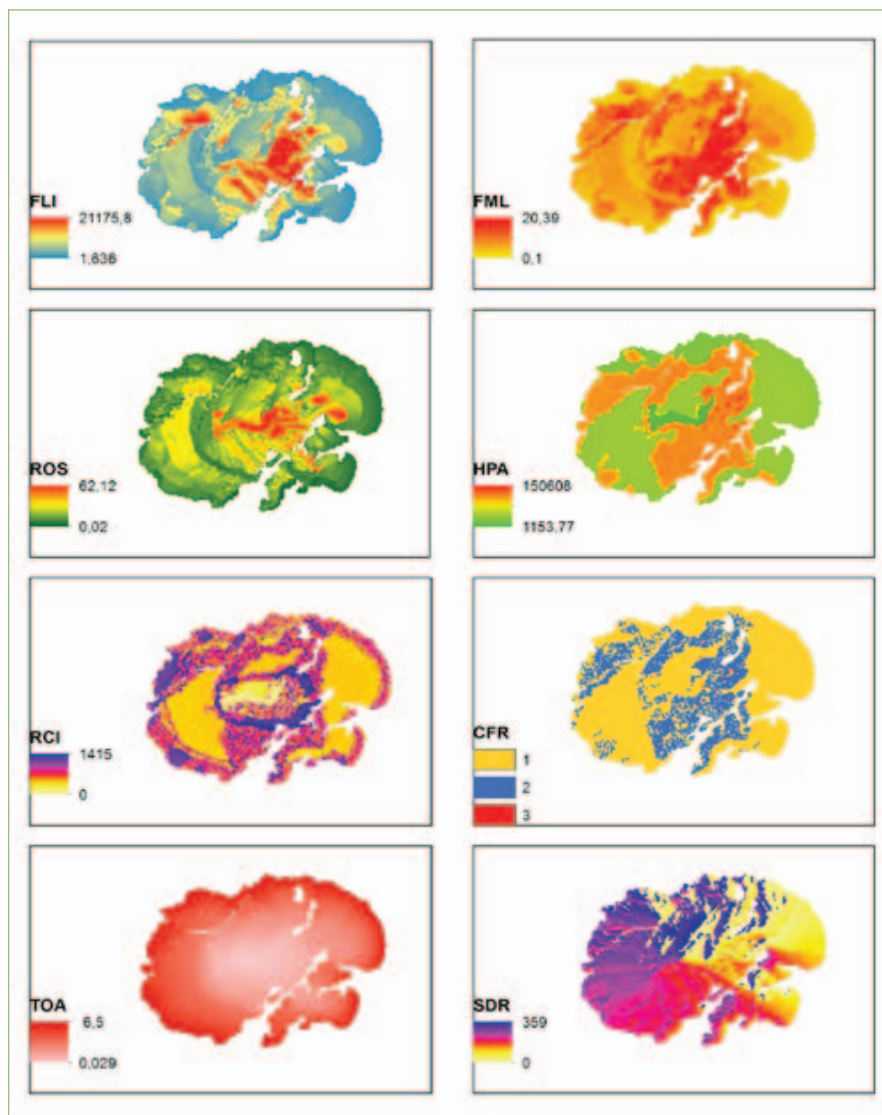


Figura 42. Diferentes ráster de salida para un mismo punto de simulación libre en el escenario actual de modelos de combustible. FLI(Intensidad del frente de llama), FML (Longitud de llama), ROS (Velocidad de propagación), HPA (Calor por unidad de superficie), RCI (Intensidad de reacción), CFR (Subida a copa), TOA (Tiempo de llegada), SDR(Dirección de la propagación)

- Datos de área y perímetro en función del tiempo establecido en el apartado Parámetros (30 minutos), tanto en gráficas como en tablas. Se recopilaron los valores medios, máximos y desviaciones estándar de todas las simulaciones (Figura 43).

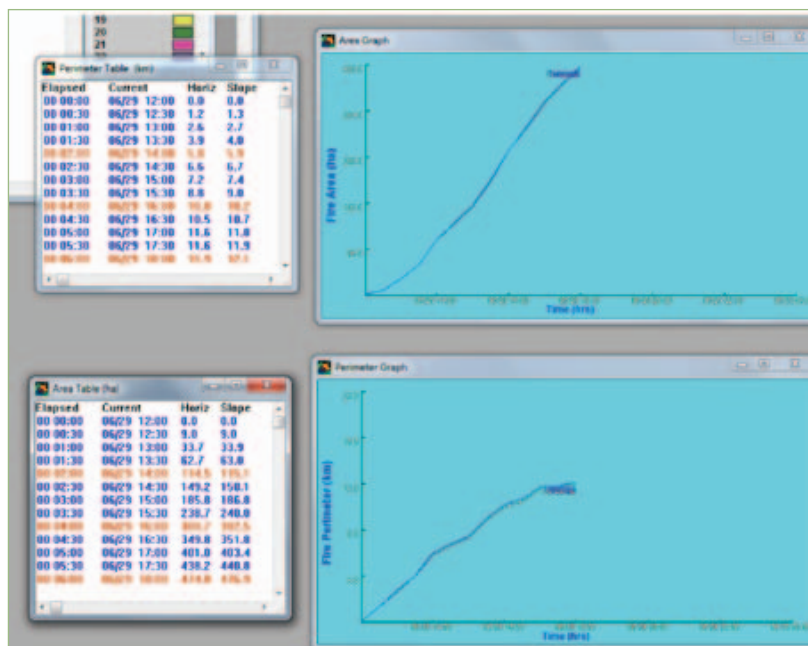


Figura 43. Resultados en formato de tablas y gráficos que ofrece FARSITE.

Además de las salidas descritas, FLAMMAP permite simular los vientos locales con el módulo WINDNINJA, generando un mapa de salida de vectores de propagación y dirección de propagación según los cambios en la topografía. Presenta además un optimizador de tratamientos selvícolas preventivos que localiza en el espacio las zonas críticas donde sería necesario priorizar las actuaciones según el comportamiento previsto en simulación libre.

4.2.3 Descripción de escenarios de gestión

Con el objetivo de observar si la realización de tratamientos selvícolas ayuda en la prevención de incendios, se realizan las siguientes simulaciones a escala de paisaje en el macizo de Caroig:

- Situación actual (Escenario A)
- Situación actual con incremento de superficies agrícolas clasificadas como modelos PM1 y PM2, según inventario de cultivos abandonados proporcionado. (Escenario B)
- Reducción de la densidad aparente de los modelos arbolados, con motivo de los tratamientos selvícolas propuestos (Escenario C)
- Reducción de la densidad aparente de los modelos arbolados y cambio de modelo de combustible a otro más óptimo en cuanto a menor combustibilidad. Estos cambios se resumen en la Tabla 32: (Escenario D)

Pastos	P1	P1 es el modelo óptimo. Mediante desbroce mecanizado en los modelos P2 y P3 se consigue una reducción de la carga del combustible
	P2	
	P3	
Pasto-matorral	PM1	PM1 es el modelo a conseguir. Mediante operaciones de desbroce se consigue una reducción de la carga del combustible
	PM2	
Matorral	M1	M1 es el modelo a conseguir. Mediante operaciones de desbroce se consigue una reducción de la carga del combustible
	M2	
	M3	
Matorral bajo arbolado adulto	MA1	Este modelo cuenta con un número de pies por hectárea elevado: 3500 pies/ha, luego el objetivo es reducirlo a 1000 pies/ha mediante trabajos de clareo sistemático o semi-selectivo, que supone una extracción del 72%
	MA2	Este modelo tiene 250 pies/ha. Reducción del 10% que supone 225 pies/ha
	MA3	Este modelo tiene 300 pies/ha, pero consta de matorral alto, luego con labores de desbroce se puede conseguir un modelo MA2. Reducción 10% que supone 270 pies/ha
	MA4	Este modelo tiene 300 pies/ha. Cuenta con restos leñosos junto a arbolado adulto. Labores de limpieza y extracción a MA2. Reducción del 10% que supone 270 pies/ha

Tabla 32. Resumen de los tratamientos selvícolas propuestos en el macizo de Caroig.

La reducción del 10 % se realiza como tratamiento sanitario de la masa, para eliminar los pies muertos o dominados, ya que la densidad que presenta cada modelo no necesita ser disminuida.

Hojarasca bajo arbolado	HA	Este modelo es el óptimo a tener en toda la masa, ya que no tiene matorral y el arbolado es adulto y con una densidad de 250 pies/ha
--------------------------------	----	---

Para cada simulación se consiguen los ficheros *ráster* de salida observados en la Tabla 31. Para su posterior análisis estadístico, de cada ráster se obtiene la media, valor máximo, valor mínimo, desviación estándar y la suma de los valores de las celdas.

En el caso de Enguera se simuló el escenario actual de acuerdo con los datos más concretos del área de estudio (escala monte en Enguera):

- Situación actual: escenario A1
- Reducción de densidad aparente de modelos arbolados por efecto de una clara fuerte (C1)
- Reducción de densidad aparente de modelos arbolados por efecto de una clara fuerte y desbroce del matorral que implique cambio de modelos de combustible de matorral a modelos de hojarasca bajo arbolado HA que equivale a modelo 8 del sistema BEHAVE (Escenario D1). Por tanto se simula el efecto a corto plazo de una reducción de matorral bajo arbolado.

4.2.4 Análisis estadístico

Se utilizó el test no paramétrico de Mann-Whitney ($p < 0,05$) para comparar las medianas de la distribución de las variables de salida de las simulaciones entre el escenario actual de modelos de combustible (escenario A) y escenarios futuros según diferentes opciones de gestión de la biomasa:

1. Incremento de la superficie forestal por efecto del abandono de terrenos agrícolas (escenario B).
2. Disminución de la espesura en terrenos forestales arbolados en los que se realicen tratamientos de extracción exclusivamente de biomasa arbórea (modelos MA). En este escenario se asume que la extracción de biomasa supondría una disminución de la densidad aparente de copas (kg/m^3) pero no supone extracción significativa de matorral bajo copas (escenario C).
3. Disminución de la espesura arbórea y extracción significativa de la biomasa arbustiva que suponga un cambio de modelo de combustible de matorral (modelos PM, M y MA) y de densidad aparente de copas (modelos MA). Por tanto, es una situación en la que al escenario C se le añade un desbroce bajo copas y en el que además se realizaran extracciones de biomasa (escenario D).

Se compararon los valores medios, máximos y las desviaciones estándar de cada simulación entre el escenario A y los escenarios B, C y D respectivamente. En el caso del potencial de fuego de copas se usó la suma del número de píxeles clasificados como fuego de superficie (1), pasivo (2) o activo de copas (3).

Los análisis preliminares efectuados informaron sobre el incumplimiento de los requisitos paramétricos. Por tanto para detectar tanto el efecto del factor escenario como las interacciones entre los escenarios con cambios más significativos y los puntos de inicio de los incendios en los diferentes modelos de combustible presentes, se utilizó un diseño factorial de ANOVA usando la regresión por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares* PLS). Los factores fueron el escenario con dos niveles (A y D) y los modelos de combustible (13 niveles para cada uno de los modelos presentes en los que se iniciaba cada simulación de incendio). Las variables dependientes fueron los valores medios correspondientes a las salidas de las simulaciones. Asumiendo el principio de parsimonia, se fijaron tres componentes con el objeto de que fueran lo más explicativos posibles y se comprobó el sentido físico de los coeficientes escalados de cada variable para valorar su importancia relativa en la construcción del modelo. Se consideró que los factores o interacciones con valores más altos de su coeficiente escalado y con mayores pesos (*X-Weights*) para las tres componentes seleccionadas son los más significativos para explicar las salidas de comportamiento del fuego y superficies afectadas.

Se utilizó el paquete STATISTICA® 7.0 para el análisis de los datos.

4.3 ANÁLISIS DE ÁREAS CORTAFUEGOS Y LÓGICA FUZZY

4.3.1 Planteamiento y justificación

Las áreas cortafuegos se construyen con el fin de fraccionar el territorio como medida preventiva de los incendios forestales, siendo infraestructuras de apoyo y seguridad fundamentales en las operaciones de extinción. El alto coste de apertura y mantenimiento de cortafuegos puede verse en parte paliado por el aprovechamiento energético, al menos en una primera intervención. No obstante, un diseño adecuado determinará la forma óptima del área para que, cumpliendo los objetivos preventivos, permita optimizar la superficie de actuación reduciendo los costes de mantenimiento.

El Plan de la Demarcación de Xátiva establece unas anchuras de las áreas en torno a un eje (camino, pista o zona decapada a suelo mineral), dependiendo del modelo de combustible que atraviese. Así, un modelo de matorral tiene unas medidas, en cuanto a anchura del cortafuego, mayor, que un modelo de arbolado ya que se prevén velocidades de propagación e intensidades de llama mayores. Dicho Plan de la Demarcación establece unas medidas bastante rígidas para la red de cortafuegos. Estas áreas se dividen transversalmente en tres fajas o bandas: banda de decapado, banda de desbroce y bandas auxiliares.

Aplicar la pertenencia difusa en la construcción de estas áreas puede ayudar a flexibilizar las actuaciones ya que permite considerar la pendiente del terreno y degrada las zonas de desbroce, lo que puede facilitar su gestión, reduciendo los impactos visuales de diseños basados en buffer lineales, como los establecidos hasta ahora.

Por otro lado FLAMMAP permite simular incendios con diferentes anchuras de desbroce en torno a cortafuegos, así como optimizar los tratamientos de forma que se puedan priorizar actuaciones a escala monte.

4.3.2 Análisis fuzzy y optimizador FLAMMAP

El funcionamiento de la pertenencia difusa o lógica *fuzzy* consiste en transformar el ráster de entrada a una escala de 0 a 1, que indica la fortaleza de la pertenencia en un conjunto, en función de un algoritmo de difuminación especificado.

Un valor de 1 indica una pertenencia completa en el conjunto difuso; si la pertenencia disminuye a 0 quiere decir que no es miembro del conjunto difuso.

La herramienta utilizada es:

- Fuzzy Membership: tipos de pertenencia difusa utilizados:
 - Linear: define una transformación lineal desde un valor mínimo (en este caso 0) y un valor máximo (ancho de la banda de desbroce).

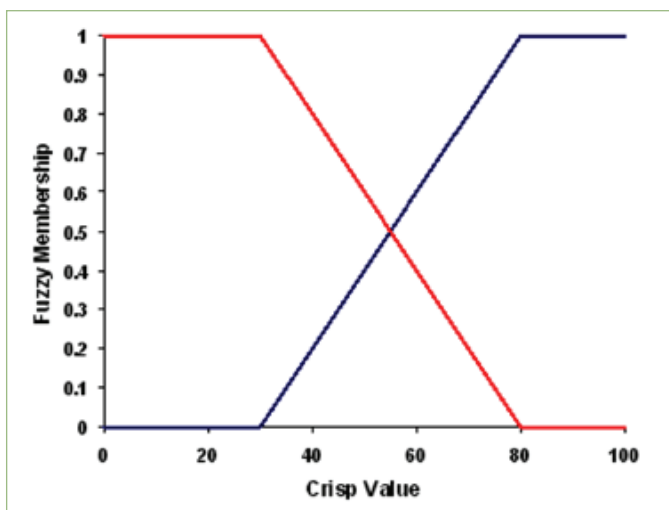


Figura 44. Función lineal Fuzzy Membership, (ESRI, 2012).

El objetivo de este apartado es poder observar las diferencias existentes entre realizar la red de cortafuegos mediante buffer lineales y buffer considerando la pendiente del terreno, mediante la herramienta *Cost Distance*. Sobre este buffer considerando la pendiente del terreno se puede aplicar la pertenencia difusa, en el sentido de obtener un gradiente como el que supondría hacer una degradación desde el eje central de los cortafuegos hasta el final de la banda de desbroce.

La anchura del área cortafuegos depende del orden del área, según lo asignado por el fraccionamiento del territorio y los modelos de combustible. Para el mejor uso de las herramientas se agrupan los modelos de combustible en 4 grandes grupos: pasto, pasto matorral, matorral y matorral bajo arbolado (Tabla 33).

Modelos	Superficie (ha)
Pasto	385,27
Matorral	42.774,61
Pasto-matorral	25.884,42
Matorral bajo arbolado	59.084,41

Tabla 33. Superficie modelos de combustible agrupados (ha).

Los datos de los cortafuegos han sido facilitados por la Generalitat Valenciana, a través de su *Direcció General de Prevenció, Extinció d'Incendis i Emergències Conselleria de Governació*. El buffer fijo (decapado) que coincide con el ancho de la red, tiene unas medidas distintas según sea de orden 1, 6 metros y de orden 2, 3 metros. Las bandas de desbroce tienen distintos valores según el modelo de combustible que atraviesen (Tabla 34).

Orden	Modelos	Banda de decapado (m)	Banda de desbroce (m)	Longitud (m)
1 ^{er} orden	Pasto	6	12	8,08
	Matorral		70	157,78
	Pasto-matorral		30	172,56
	Matorral bajo arbolado		50	173,03
2 ^o orden	Pasto	3	5	2,86
	Matorral		30	114,49
	Pasto-matorral		15	93,67
	Matorral bajo arbolado		20	144,25

Tabla 34. Medidas de las áreas cortafuegos según el orden y el modelo de combustible.

En el resto de la superficie de la zona de estudio se consigue un ráster a partir de pendientes reclasificadas en 0-5% (1), 5-10%(2), 10-30%(3), 30-60%(4) (límite de mecanización) y <60% (5), en el que mediante Cost Distance, se consigue una capa ráster con distancias que tienen en cuenta el esfuerzo que causa recorrerlas.

Las herramientas de fuzzy membership, usan esta capa para hacer que las distancias al cortafuegos sean de pertenencia borrosa: 0 valor cercano al eje central, 1 valor en el límite del ancho de la banda de desbroce.

El estudio del caso a escala monte en Enguera se completó considerando que el escenario D1 no se hiciera a nivel superficial, sino que los desbroces se concentraran en franjas más o menos anchas en el entorno de los cortafuegos. Por tanto se realizaron simulaciones FLAMMAP con reducción de densidad aparente de modelos arbolados por efecto de una clara fuerte y desbroce concentrado exclusivamente en las áreas cortafuegos. Se simularon desbroces en buffers de 100 y 200 m en torno a los cortafuegos.

Se utilizó el optimizador de tratamientos de FLAMMAP para testar la hipótesis de la idoneidad de tratamientos en la red de áreas cortafuegos existentes, o en su caso, proponer mejoras a la misma, ampliación o priorización de su mantenimiento.

4.3.3 Análisis estadístico

Para el análisis comparativo entre las superficies obtenidas a través de buffer lineal y buffer *fuzzy* se utiliza un Friedman ANOVA, donde el factor es el tipo de buffer (*fuzzy* o lineal) y la variable dependiente es la superficie total de la red de cortafuegos del macizo de Caroig. Se consideran 8 réplicas por tipo de buffer correspondientes a las superficies calculadas para cada grupo de modelos de combustible (pasto, matorral, pasto-matorral, matorral bajo arbolado) en los dos órdenes de importancia de los cortafuegos 1^{er} y 2^o orden).

4.4. RESULTADOS

4.4.1 Análisis de la eficacia preventiva de escenarios selvícolas y de gestión de combustible para la obtención de biomasa

Los test de Mann-Withney para comparar el escenario actual con los escenarios definidos muestran diferencias significativas para las variables de salida (outputs) obtenidas en las simulaciones FARSITE entre diferentes escenarios (Tabla 35).

Se puede comprobar que el paso de superficie agrícola abandonada a modelos de combustible forestal (escenario B) supone un incremento significativo en muchos de los parámetros de comportamiento y en la superficie y perímetro final medio. El aumento de superficies forestales por abandono agrícola en el área de estudio ya ha sido mencionado como una amenaza para la aparición de grandes incendios, (Quílez y Chinchilla 2013). Como era esperable, no se detectaron diferencias significativas en el número de píxeles con actividad de copas (pasivo o activo) ya que sólo se ha considerado un incremento en la superficie ocupada por pastos y matorrales.

La extracción exclusivamente de biomasa arbórea (escenario C) que supone una disminución de la biomasa y la densidad aparente de copas en los modelos MA, no ha supuesto una disminución significativa de los parámetros de comportamiento del fuego y de la superficie afectada. Sin embargo, la inclusión de la extracción de matorral que supusiera cambios de modelos de combustible (escenario D) genera diferencias significativas en todas las variables excepto en el número de píxeles con fuego activo de copas, (Stephens 1998).

Es de destacar que todos los tratamientos han supuesto una disminución de la variabilidad (desviación estándar) de los parámetros de salida del incendio aunque su mediana no ofrezca diferencias significativas en el caso del tratamiento C respecto al A (Figura 45). Por tanto, en todos los casos parece existir una tendencia a disminuir las condiciones extremas de propagación, obteniendo comportamientos del fuego en un rango más reducido, también para el escenario C, (Stephens y Moghaddas 2005).

Variable	Comparación escenarios A y B		Comparación escenarios A y C		Comparación escenarios A y D	
	Test U Mann-Withney	p	Test U Mann-Whitney	p	Test U Mann-Withney	p
Área pendiente (ha)	99,0	0,01312	62,5	0,48973	376,0	0,00003
Perímetro pendiente (km)	91,5	0,00703	57,5	0,37268	410,5	0,00013
FLI_MEAN	99,0	0,01312	64,0	0,54109	431,0	0,00030
FML_MEAN	111,0	0,03027	68,0	0,65065	429,0	0,00028
ROS_MEAN	122,0	0,05939	42,5	0,12928	437,0	0,00038
HPA_MEAN	121,0	0,05605	66,5	0,59479	495,0	0,00305
RCI_MEAN	155,0	0,28528	55,5	0,33074	431,0	0,00030
CFR_SURFACE	85,0	0,00424	58,5	0,39475	362,0	0,00001
CFR_PASSIVE	154,5	0,27446	74,5	0,82861	462,5	0,00098
CFR_ACTIVE	188,5	0,78363	62,0	0,48973	659,0	0,17736
FLI_MAX	111,0	0,03027	61,0	0,46497	484,0	0,00211
FML_MAX	116,0	0,04155	65,0	0,56763	445,5	0,00052
ROS_MAX	127,0	0,07854	65,5	0,56763	534,0	0,01009
HPA_MAX	154,5	0,27446	75,5	0,85937	343,5	0,00001
RCI_MAX	94,5	0,00894	72,5	0,76783	473,5	0,00144
FLI_SD	97,0	0,01128	65,0	0,56763	501,0	0,00370
FML_SD	118,0	0,04693	71,0	0,73790	552,0	0,01666
ROS_SD	103,0	0,01755	49,5	0,22247	520,0	0,00669
HPA_SD	107,0	0,02319	74,5	0,82861	509,0	0,00477
RCI_SD	127,0	0,07854	79,5	0,98427	480,0	0,00184

Tabla 35. Resultados del análisis estadístico (valores del estadístico U de Mann-Withney y p-valor) entre los escenarios A y B, escenarios A y C y escenarios A y D. En rojo se muestran los valores con un nivel de significación mayor del 95%, en azul, mayor del 90%.

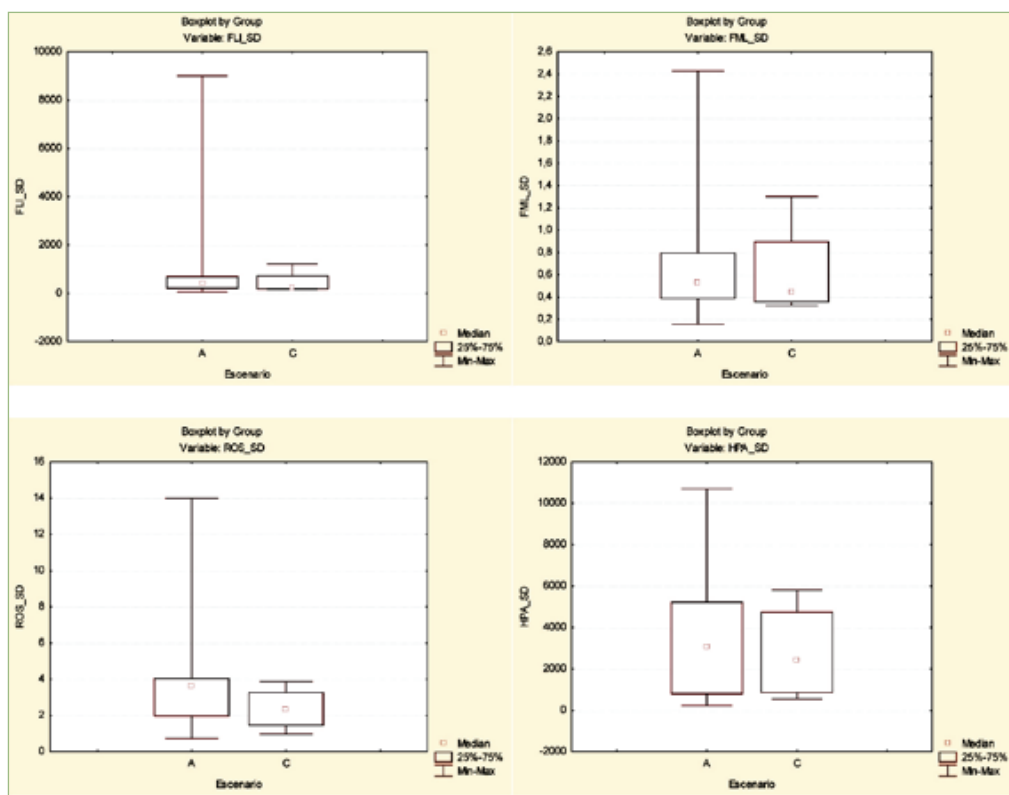


Figura 45. Media y rango de la desviación estándar (SD) de las variables de salida FARSITE para los escenarios A y C: intensidad lineal (FLI), longitud de llama (FLA), velocidad de propagación (ROS) y calor por unidad de área (HPA).

Los escenarios A y D son los que han mostrado las mayores diferencias, por lo que se decidió aplicar un ANOVA PLS para determinar el efecto combinado del escenario y los modelos de combustible en los que se iniciaban los incendios ($R^2Y=0,54$, $R^2X=0,25$, 3 componentes).

Los resultados ratifican que es el escenario el factor de mayor importancia explicativa de las variables de salida de FARSITE, no obstante se han detectado el efecto positivo o negativo de algunos modelos de combustible y de las interacciones entre el modelo de combustible y el escenario. En la Figura 46, donde se muestran los coeficientes escalados del modelo, se puede comprobar que es el escenario A (sin intervención), los incendios que empiezan en modelos PM1, P3 (+), los modelos MA2, MA3, MA4 (-) y las interacciones M2 y M3 con el escenario A (+) los factores que más incrementan la superficie afectada por el incendio. Por tanto, es la intervención en los modelos de matorral M2, M3, PM1 y P3 en el escenario actual los que en caso de un gran incendio disminuirían más eficazmente la superficie afectada por el fuego. La eficacia en la reducción de los parámetros de comportamiento en modelos de matorral ha sido contrastada en experimentos de laboratorio (Marino et al. 2011) y habiendo validado su comportamiento mediante modelos físicos (Marino et al. 2012, Jiménez et al. 2013b). Sin embargo, y tal como obteníamos en los test no paramétricos, los incendios iniciados en modelos de matorral y arbolado (MA) tienen menos importancia para explicar la superficie total afectada.

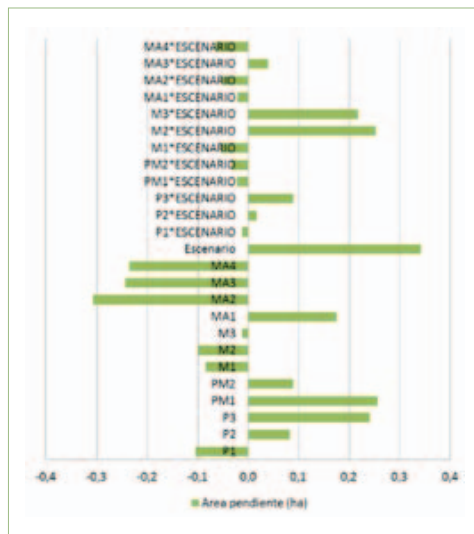


Figura 46. Coeficientes escalados de superficies, según la interacción entre los escenarios A y D.

En la Figura 47 se detallan los coeficientes escalados del modelo en cuanto a los valores medios de intensidad de llama. Se observa que sigue la tendencia comentada de las superficies, siendo el escenario, los modelos PM1 y PM3, el modelo MA1 (a diferencia del resto de modelos de matorral arbolado) y las interacciones de los modelos M2 y M3 con el escenario los que aumentan la intensidad del frente de llama, lo que podría producir más problemas en las tareas de extinción (fuegos fuera de capacidad de extinción). Los resultados sugieren que si queremos reducir la intensidad lineal para tener más oportunidades de control del incendio por los servicios de extinción, podría ser eficaz la intervención en modelos MA1 reduciendo la densidad aparente de copas, (Stephens y Moghaddas 2005, Jiménez et al. 2013b). Como ya se ha comentado estos tratamientos no tienen efectos sobre el resto de las variables si no vienen además acompañadas de cambios de modelos de combustible en los modelos de matorral (M2, M3), pasto (P3) y pasto-matorral (PM1), que son los que aumentan la superficie afectada por los incendios, (Stephens 1998).

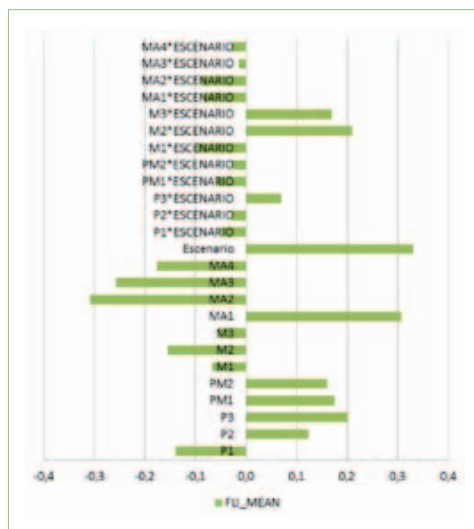


Figura 47. Coeficientes escalados de Intensidad del frente de llama (FLI), según interacción entre escenarios A y D.

En los resultados obtenidos al comparar la influencia de la presencia de fuego a copas (Figura 48), se puede observar que aun cuando el punto de ignición se encuentra dentro de modelos de matorral (M3 y M2), o de pasto y pasto matorral (P3 y PM1) se sigue la tendencia general que cumplen todas las variables estudiadas del comportamiento del fuego. Ello indicaría que la presencia de fuego de copas no depende tanto de la disminución de combustible

en zonas arboladas (MA) como en los cambios de modelos de las grandes extensiones de matorral con alta carga de combustible (Interacción escenario*M2, escenario*M3). Los incendios iniciados en estas áreas generarían una intensidad suficiente como para aumentar el potencial de fuegos de copa en las áreas colindantes de modelos MA. Estos resultados indicarían que un cambio de modelos M2 y M3 a M1, tal como se plantea en el escenario D, no sólo tendría un efecto significativo en la disminución de la superficie total sino que disminuiría la presencia de áreas con fuego activo de copas. La necesidad de actuar a gran escala como única alternativa a la reducción de las superficies afectadas por los incendios coincide con recientes resultados de simulaciones con MEDFIRE en diferentes escenarios de régimen de incendios y tipos de gestión en Cataluña, (Regós et al., 2013, Brotons et al., 2013).

Estos resultados se pueden observar en las Figuras 49 y 50, en las que se ven las diferencias entre los perímetros del escenario A, con los escenarios B, C y D. En la Figura 51 se detallan los ráster de salida de intensidad del frente de llama y de calor por unidad de superficie entre los escenarios A, C y D.

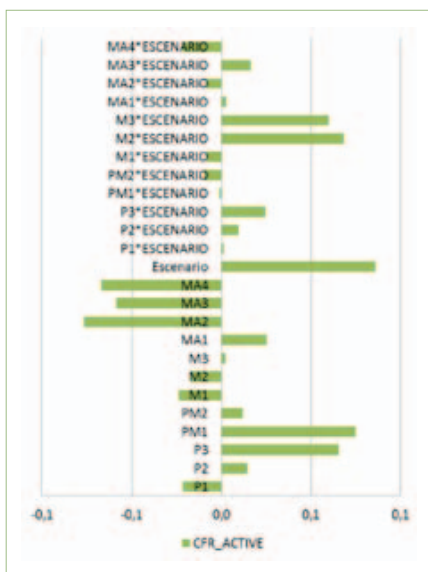


Figura 48. Coeficientes escalados de la variable subida de fuego a copa, según interacción entre los escenarios A y .

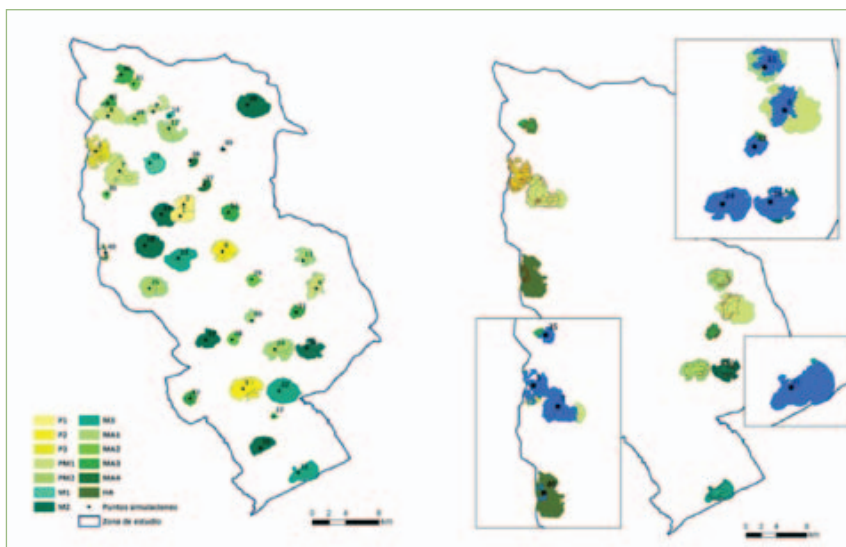


Figura 49. Izquierda: Simulación escenario actual. Derecha, comparación entre los escenarios A y B, en el detalle se puede observar cómo han aumentado los perímetros (en colores) respecto a los del escenario A (en azul).

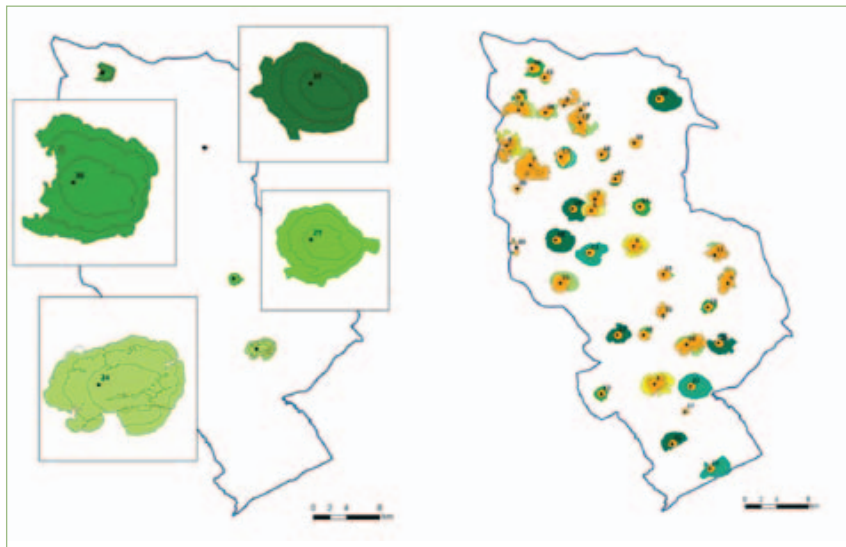


Figura 50. Izquierda: comparación entre los escenarios A y C, en el detalle se puede observar cómo los perímetros permanecen similares salvo en el punto 24, en el que se observan alteraciones. Derecha, comparación entre los escenarios A y D, en el detalle se puede observar cómo han disminuido los perímetros (en naranja) respecto a los del escenario A (en colores).

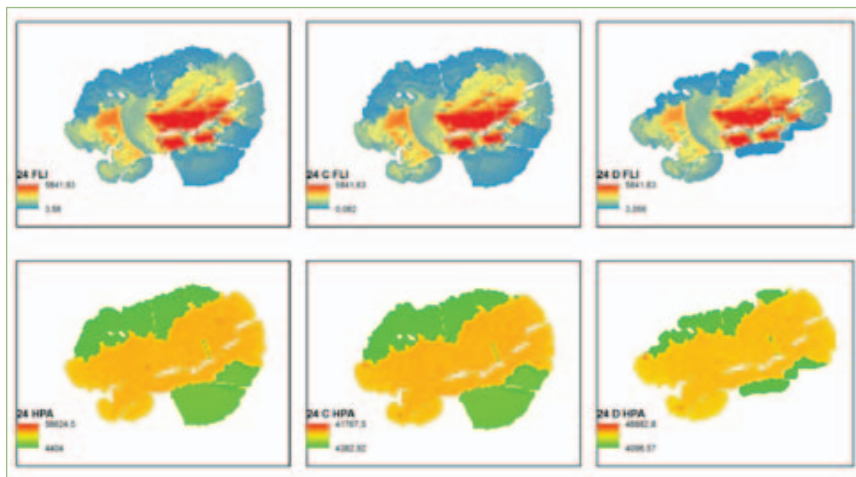


Figura 51. Detalle de los resultados obtenidos para el punto 3 (debido a que presentaba subida de fuego a copa). En la parte superior se muestran los cambios de intensidad del frente de llama (FLI) entre los escenarios A, C y D. En la parte inferior, se pueden ver las diferencias de calor por unidad de área (HRA) entre los escenarios A, C y D.

La zona simulada en los puntos de inicio 10 y 24 (figura 27) que corresponden a los montes arbolados de Enguera con baja afectación por la serie histórica de incendios (figura 25), fue objeto de un estudio exhaustivo con FLAMMAP para corroborar los resultados obtenidos con FARSITE, o en su caso, añadir más resultado al estudio que puedan sugerir diferencias en el análisis por el cambio de escala y la inclusión de modelos de combustible específicos basado en inventario, así como el efecto de vientos locales que anteriormente no se simularon. Se muestran los resultados, en la Figuras 52 y 53 y en la Tabla 36.

Con el valor de la longitud de llama obtenido en el escenario actual (A), el fuego no podría ser controlado con ataque directo en la mayor parte de la superficie del monte V072 de Enguera. El incendio se propagaría extremadamente rápido en la mayor parte de la superficie en las condiciones actuales. Según la intensidad lineal en el escenario A, el fuego no podría ser controlado con ataque directo en la mayor parte de la superficie de Enguera, redundando en unos mayores costes de extinción y área potencialmente ardiendo. En este caso, se observa mayor superficie clasificada como fuego de copas respecto a las simulaciones FARSITE, con lo que los modelos de combustible estimados con la capa base del Consorcio de Bomberos de Valencia podían estar subestimando la situación de alto potencial de subida

de fuego a las copas de este monte. La inclusión de los vientos locales, teniendo en cuenta las fuertes pendientes de muchas de las áreas estudiadas, hace más realista el resultado, poniendo en evidencia su implicación en la propagación, tanto más en escenarios de altas carga de combustible.

En el escenario C1 (claras fuertes) se observó que la superficie susceptible de fuego de copas activo disminuiría del 12 al 0 %, pero el 80% de la superficie **continúa susceptible al entorchamiento (fuego pasivo de copas)**. En consecuencia, el tratamiento **sólo del arbolado** no disminuiría significativamente el área potencialmente afectada por entorchamiento, corroborando los resultados obtenidos a escala paisaje. Se encontró además que los parámetros del **comportamiento del incendio superficial** (longitud de llama, velocidad de propagación, intensidad lineal) **no se verían afectados** por el tratamiento del arbolado sin desbroce del matorral.

Se observó que la clara en conjunto con el control del matorral (escenario D1) **disminuiría en un 50% el área susceptible de fuego de copas a corto plazo (cambio a modelos de combustible de hojarasca bajo arbolado)**. Esta disminución del área afectada por fuego de copas tendría implicaciones económicas en el coste de la extinción, en el riesgo de erosión post-incendio, y en la mortalidad del arbolado y ataque de plagas tras incendio (e.g. Vega et al., 2011). A diferencia de en la situación actual (A1) o en el escenario de sólo tratamiento de arbolado (C1), el escenario de intervención en el arbolado acompañado de desbroce (D1) aumentaría la superficie donde se podría controlar el incendio con medios de ataque directo, en base a las simulaciones de longitud de llama, velocidad de propagación e intensidad lineal del incendio, lo cual supone un ahorro en costes de extinción y modificaría el área potencialmente afectada en caso de incendio (Tabla 36).

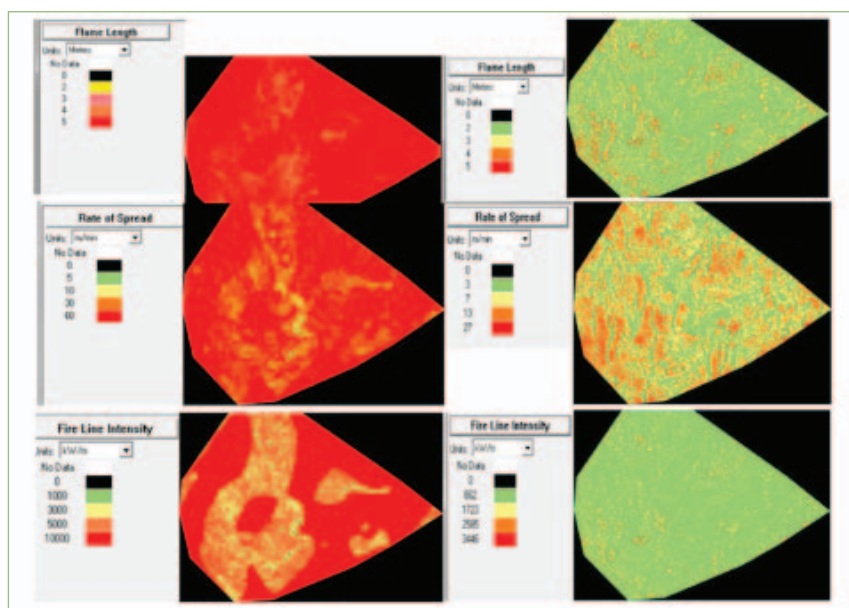


Figura 52. Resultados de la simulación de comportamiento del incendio en Flammap, bajo el escenario actual (izquierda) y bajo el escenario D1 de desbroce acompañado de clara fuerte en toda la superficie de estudio en Enguera. De arriba abajo se muestran: longitud de llama (flame length, FL), velocidad de propagación (rate of spread, ROS) e intensidad lineal del incendio (fire line intensity) para la zona de estudio.

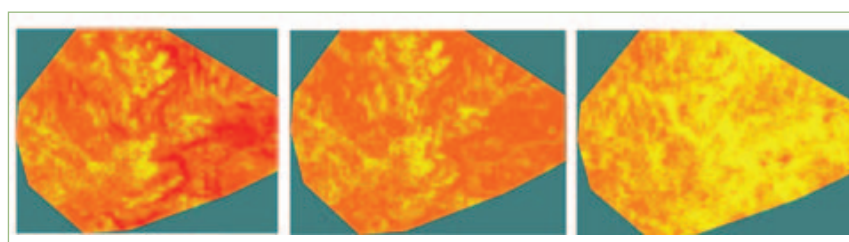


Figura 53. Resultados de la simulación con Flammap del riesgo de fuego de copas en la zona de estudio de Enguera, bajo el escenario actual (izquierda), escenario de clara fuerte C1 (figura intermedia), y de desbroce de matorral acompañado de clara fuerte D1. En amarillo se muestran zonas de fuego superficial, en naranja con riesgo de entorchamiento y en rojo con riesgo de fuego de copas activo.

	ÁREA (has)		
	A1 (ACTUAL)	C1 (CLARA FUERTE)	D1 (CLARA + DESBROCE)
FL(m)			
1,5	2,8	2,8	2.964,8
2,5	33,1	33,1	559,1
3,5	564,8	564,8	220,6
>5	3.410,0	3.410,0	266,1
ROS (m/min)			
5	11,6	11,6	2.425,9
10	157,8	157,8	936,7
30	1.088,3	1.088,3	486,3
>60	2.753,0	2.753,0	161,7
FLI (kw/m)			
1000	51,5	51,5	3.573,5
3000	631,7	631,7	431,5
5000	678,4	678,4	5,6
>10000	2.649,1	2.649,1	0,0
Riesgo de fuego de copas			
Fuego superficial	702,01	796,11	2.379,83
Entorchamiento	2.836,35	3.214,50	1.630,78
Fuego de copas activo	472,25	0	0

Tabla 36. Distribución de la superficie de estudio en Enguera según los valores predichos de longitud de llama (FL), velocidad de propagación (ROS), intensidad lineal del frente (FLI) y riesgo de fuego de copas para los escenarios actuales y de clara o clara+desbroce de matorral en toda la superficie del área estudiada en Enguera.

4.4.2 Análisis de la red de cortafuegos mediante lógica fuzzy y optimizador FLAMMAP

Los resultados obtenidos del análisis estadístico (Figura 54), donde se comparan los 8 datos de superficie, según modelo de combustible y orden, (Tabla 37) en cada uno de los escenarios (*fuzzy* y lineal) demuestran que la superficie en el escenario *fuzzy* es significativamente menor que utilizando el buffer lineal (p -valor=0,011719), lo que significaría una optimización de los recursos a la hora de ejecutar el mantenimiento de las redes de cortafuegos consideradas en el Macizo de Caroig.

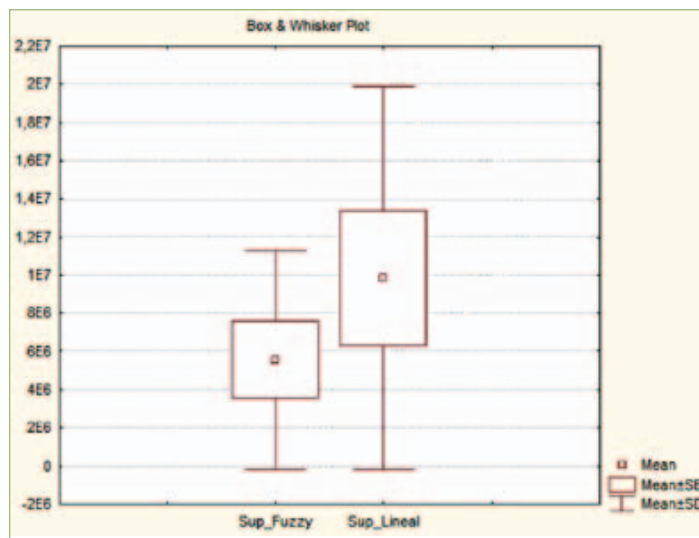


Figura 54. Resultados del análisis estadístico entre las superficies resultantes de construir un buffer lineal y otro mediante Cost Distance y pertenencia difusa. El Friedman ANOVA muestra diferencias significativas al 95% en ambos tipos de buffer para el cálculo de las superficies de actuación ($p < 0,05$).

Al ser un ancho de desbroce irregular, tanto en el interior del área como en los bordes exteriores, se obtienen áreas de menor impacto visual y adaptadas al terreno ya que se ha utilizado la pendiente como variable de cálculo (Figura 55). El uso de dicha variable asegura además mayores anchuras en zonas de mayor pendiente lo que está justificado desde el punto de vista preventivo, (Pimont et al. 2009).

Orden	Modelos	Superficie buffer eje central (m ²)	Superficie buffer fuzzy (m ²)	Media	Superficie buffer lineal (m ²)
1 ^{er} orden	Pasto	99.672	131.400	0,31	214.696
	Matorral	1.936.980	15.734.928	0,46	27.037.252
	Pasto-matorral	2.131.856	7.610.924	0,41	12.130.348
	Matorral bajo arbolado	2.152.564	11.748.012	0,45	22.078.960
2 ^o orden	Pasto	17.648	16.492	0,32	31.616
	Matorral	695.200	4.213.524	0,45	7.695.108
	Pasto-matorral	572.280	1.815.108	0,41	3.138.204
	Matorral bajo arbolado	879.664	3.173.188	0,32	6.481.740

Tabla 37. Resultado de las superficies (m²) buffer lineales y buffer fuzzy.

Los valores de la degradación difusa se pueden reclasificar en rangos en los cuales se establezca la cantidad de biomasa a extraer, por ejemplo (Tabla 38):

Reclasificación fuzzy	% a extraer
0-0,2	10%
0,2-0,4	25%
0,4-0,6	40%
0,6-1	100

Tabla 38. Ejemplo extracción mediante rangos fuzzy.

Así en términos de gestión, contando con datos de inventario de pasto y matorral, se puede cuantificar la biomasa a extraer. La determinación de los puntos de corte de los rangos se puede establecer a criterio del gestor o directamente en la ejecución de los trabajos, lo que resulta un buffer más flexible tanto para su ejecución como para su mantenimiento.

En la Tabla 38 se detallan también los datos medios de los valores *fuzzy* en cada buffer. Todos los registros son menores a 0,5 lo que demuestra que la pendiente tiene un gran peso a la hora de hacer el buffer, por lo que se justifica la opción de utilizar las distancias en función de costes en esfuerzo.

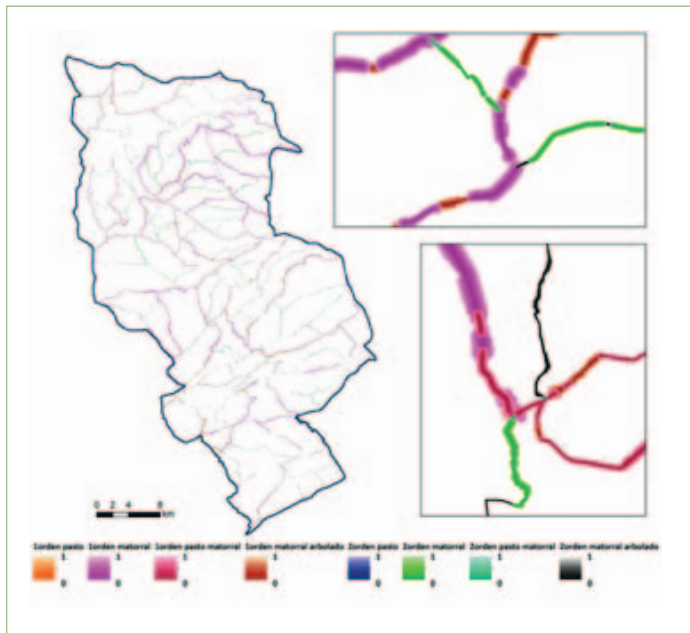


Figura 55. Áreas cortafuegos mediante pertenencia difusa y detalle de dos zonas, donde se puede observar los diferentes tamaños de los buffer.

Las simulaciones *FlamMap* en la zona de Enguera usando buffers a distancia fija de tratamiento de desbroce de 100 m (670 ha tratadas en el total del monte) y 200 m (1.210 ha) que pasaría a modelo HA o modelo 8 BEHAVE, (tabla 38) muestran que la red de tratamientos afectaría ralentizando velocidad de propagación del incendio, rompiendo la continuidad del combustible y disminuyendo la longitud de llama, permitiendo oportunidades para el control del incendio mediante técnicas de ataque directo o indirecto.

En la Figura 56 se muestran las rutas preferentes de un incendio con viento de oeste en el monte de Enguera, originadas con el módulo *Minimum Travel Time* (MTT) de *FlamMap* así como la superficie potencialmente ardiada para cada tiempo de llegada del frente, en el escenario actual, y en escenarios de tratamiento de clara fuerte y desbroce de matorral en buffers de 100 y 200 m en los cortafuegos. Los tiempos de llegada y las áreas ardiadas para cada escenario se resumen en la Tabla 39.

Se puede observar como bajo las condiciones actuales, la totalidad del monte de Enguera ardería en un incendio en menos de 10 horas de incendio. Unido a la dificultad del control en las condiciones actuales, esto resultaría en el incendio incontrolado de más de 4.000 en menos de 10 horas de incendio bajo las condiciones actuales en Enguera.

La red de cortafuegos así planteada ofrece una oportunidad de control del incendio a las 5 h (300 min) de ser iniciado. Si el control es efectivo apoyándose en esa red de cortafuegos, la superficie ardiada en un escenario de tratamientos serán de 2.155 y 1.773 has para los escenarios de *buffers* de 100 y 200 m, lo que supone una superficie no ardiada de 1.221 y 1.604 has en comparación con las 3.377 has ardiadas en ese mismo tiempo en el escenario actual de no intervención (Tabla 40).

Estos resultados coinciden con los resultados del módulo de optimización de tratamientos (*Treatment Optimization Module*, TOM) de *FlamMap*, que propone centrar los tratamientos en los citados cortafuegos por su mayor eficacia en frenar el avance de un frente de un incendio y disminuir el área afectada por incendio en Enguera.

Escenario	A (ACTUAL)	C1 (CLARA)	D1 (C1+DESBRUCE)	Buffer 100 m	Buffer 200 m
FL (m)					
media	11,5	11,5	3,0	7,3	6,5
sd	15,8	15,8	3,6	12,4	11,8
ROS (m/min)					
media	37	37	7,4	26	22
sd	58	58	7,4	47	44
FLI (kw/m)					
media	17.353	17.353	309	10.418	8.737
sd	31.510	31.510	525	23.938	22.284

Tabla 39. Valores promedios y desviación estándar predichos para el área de estudio de Enguera de longitud de llama (FL), velocidad de propagación (ROS) e intensidad lineal del frente (FLI) para los escenarios estudiados.

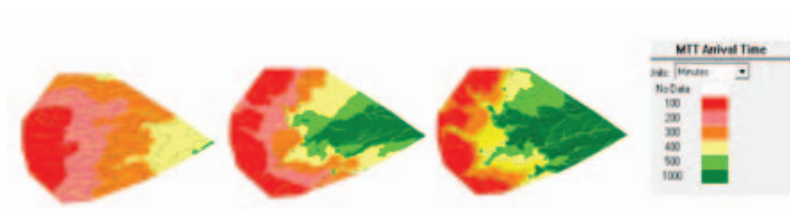


Figura 56. Tiempos de llegada de un frente de incendio predichos por el módulo MTT de FlamMap en escenario actual (izquierda), escenario de tratamiento de la red de cortafuegos con buffers de 100 m (figura intermedia), y escenario de tratamiento de la red de cortafuegos en buffers de 200m (figura de la derecha).

Tiempo (min.)	Superficie acumulada ardida (has)		
100	825	944	804
200	2.006	1.555	1.381
300	3.377	2.155	1.773
400	3.996	2.853	2.159
500	4.054	3.354	2.724

Tabla 40. Superficie ardida para cada tiempo de llegada de un incendio en el escenario actual, y con tratamientos en buffers de 100 y 200 m en la red de cortafuegos de Enguera (buff100 y buff200, respectivamente).

4.4.3 Interpretación de los resultados

- El presente trabajo es uno de los primeros, según los antecedentes y bibliografía consultados, en utilizar los simuladores de incendios a escala paisaje, con el fin de aplicar medidas selvícolas con fines energéticos que ayuden en la prevención de incendios forestales en España.
- Los resultados obtenidos indican que la distribución espacial de los combustibles y la realización de tratamientos selvícolas influyen en los patrones de propagación de los incendios.
- Los tratamientos selvícolas establecidos en el contexto del proyecto Bioenergy and Fire Prevention, no suponen una medida significativa para la prevención de incendios a no ser que se actué a gran escala, extrayendo gran cantidad de biomasa en las zonas de pasto y matorral. Los resultados conseguidos de la comparación de los diferentes escenarios demuestran que:

- El abandono de la agricultura modifica los modelos de combustible, pasando de ser una zona no combustible a tener valores, de pasto-matorral, por lo que se debe tener en cuenta en la gestión de la zona y en las medidas de prevención
- Con la gestión de las zonas arboladas se consigue reducir su densidad aparente, pero no es así con los perímetros de las zonas simuladas. Al añadir el resto de tratamientos, desbroces, para conseguir modelos de combustible más óptimos, se denotan diferencias significativas en la gestión de los modelos de matorral y pasto matorral, por lo que la aplicación de tratamientos exclusivamente sobre la masa arbolada, no consigue lo esperado en términos de prevención de incendios.
- El uso de los dos simuladores utilizados para evaluar el comportamiento del fuego cuando se plantean diferentes medidas de gestión, en condiciones meteorológicas extremas, es adecuado para la zona de estudio del Macizo de Caroig. En concreto, la utilización de FARSITE, debido a los resultados observados, plantea que su uso en diferentes escenarios, detecta diferencias significativas en la predicción del comportamiento del fuego y permite observar y evaluar esos cambios a corto plazo. La información procedente de datos LIDAR de alturas de arbolado y cobertura vegetal junto con los datos del inventario forestal realizado en el marco del proyecto, han permitido obtener datos sobre la biomasa a extraer y la densidad aparente en zonas arboladas, estableciendo una relación entre las alturas procedentes de los datos LIDAR y los diámetros normales del inventario forestal. El moderado ajuste de los modelos diámetro-altura obtenidos en campo sugieren la alta irregularidad que presentan estas masas. Por tanto la extensión de estos datos a escala paisaje mediante los datos de altura del LIDAR de PNOA se deben tomar con prudencia en tanto que se validen en campo.
- La información del MDT (Modelo Digital Del Terreno) descargada del IGN (PNOA), la adaptación de los modelos de combustible realizada por el Consorcio de Bomberos, junto con las capas de alturas, densidad aparente y cobertura vegetal, caracterizan de manera adecuada la mayor parte del paisaje de la zona de estudio. Los datos LIDAR expresan las alturas de la zona, que para el uso en mediciones de masas arboladas, se puede considerar demasiado en detalle debido a que cada pulso LIDAR puede captar la altura de un matorral y en el pixel vecino, la altura de un árbol, así como errores debidos a otros obstáculos como torretas de comunicaciones, líneas eléctricas, etc... El procesado de estos datos mediante una reclasificación en ArcGIS, es fundamental, debido a que las alturas de arbolado deben estar en un rango de altitudes razonable, debiéndose comprobar y validar con los datos de inventario forestal, en la zona que se trate.
- Los datos de alturas procedentes de vuelos LIDAR regulares ayudaría a que la capa de modelos de combustible pueda ser actualizada con inventarios de campo, ya que se ha observado que existen zonas en las que no concuerdan las alturas LIDAR con el modelo de combustible propuesto, ya sea por un incendio reciente o una mala clasificación debido a que no están basados en datos de campo.
- El uso de la pertenencia difusa en la creación de redes cortafuegos en el Macizo de Caroig en un contexto energético también es un proyecto pionero en España, según bibliografía consultada. Se observa que es efectivo en cuanto a optimización de los recursos, debido a que se puede cuantificar la cantidad de biomasa de la superficie a extraer y así paliar los costes que supone construir y mantener dicha infraestructura. Al tener en cuenta la pendiente del terreno, se justifica en términos de prevención de incendios. Una línea de trabajo futura puede ser la introducción de más variables en la construcción de los buffer fuzzy, como pueden ser otros componentes del triángulo del fuego: viento dominante, vientos locales debido a la topografía, exposición de la ladera por su efecto en la desecación de combustibles, o la combinación de todas ellas.
- Las simulaciones revelan alto riesgo de grandes incendios con altos costes de extinción y altos impactos ambientales en las situaciones actuales.
- El tratamiento sólo del estrato arbóreo no modifica ni el comportamiento del fuego de superficie ni el área ardida en fuego de copas.

- Las claras unidas a desbroces en superficie disminuirían la intensidad del incendio (control con medios directos más eficaz) y el área ardida por fuego de copas. El tratamiento del matorral unido a claras fuertes podría reducir en un 50% el área afectada por fuegos de copas en Enguera a corto plazo, con la consecuente disminución de la erosión y mortalidad del arbolado post-incendio. Estos resultados se tendrían que matizar a medio y largo plazo teniendo en cuenta la intensidad de desbroce realizada y el crecimiento del matorral. En cualquier caso y teniendo en cuenta que el tratamiento propuesto sería el óptimo desde el punto de vista de disminución del riesgo de incendios, dicho riesgo persiste y no evita la posibilidad de fuegos pasivos de copa, aunque sí de fuegos activos de copa.
- La implantación de tratamientos de desbroce de matorral y clara fuerte en franjas de 100 y 200 m apoyadas en los cortafuegos sería efectiva en disminuir la intensidad y el área potencialmente ardida en un incendio en Enguera. En concreto, la implantación de tratamientos de desbroce y clara fuerte en los cortafuegos en franjas de 100 y 200 m disminuiría el área potencialmente ardida en un incendio en simulación libre durante las 5 primeras horas en 36% (100 m) y 47% (200 m) del total de las 3.377 ha potencialmente ardidadas en el escenario actual.

5

- Evaluación de la potencia eléctrica instalable

5. EVALUACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA INSTALABLE

En este informe se determina la potencia eléctrica que podría instalarse en la zona del Macizo del Caroig en función de la biomasa disponible al año y, que ha sido calculada por la E.T.S.I. de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.

5.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Para el cálculo de la potencia eléctrica se establecen las siguientes hipótesis:

- Se considera la cantidad de biomasa disponible en la zona según el estudio realizado por la Universidad Politécnica de Madrid y según esto se establecen dos escenarios, según el destino del material obtenido en los trabajos forestales contemplados:
 - Escenario 1: El único destino de todo el material es su aprovechamiento como biomasa. Se dispone entonces de 6.870 t/año de biocombustible a una humedad del 45 % b.h.
 - Escenario 2. Los fustes de regeneración se destinan a un uso maderero mientras que el resto a combustible. En este caso el material disponible para una posible central es de 4.335,5 t/año, a una humedad del 45 % b.h.
- Se supone un rendimiento energía eléctrica bruta/energía primaria del 21,6 %. Según los rendimientos establecidos en el Plan de Energías renovables en España 2005-2010.
- Se establece que la central funciona 7.884 h al año (90% disponibilidad)
- Se toma una humedad de entrada del combustible a planta del 30 % b.h.
- Se toma como valor del PCI (poder calorífico inferior) del combustible que se introduce en caldera, el valor medio de los obtenidos en los ensayos realizados a las muestras recibidas de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster* procedentes de trabajos forestales en montes de la zona. Así, los valores que se toman son $PCI_p = 18,90$ MJ/kg en base seca y $PCI_p = 12,49$ MJ/kg a la humedad de trabajo (30 % b.h.).

5.2 RESULTADOS

Se muestran en la Tabla 41 los resultados que se obtiene para la zona del Macizo del Caroig según las hipótesis establecidas y teniendo en cuenta los dos escenarios posibles.

		ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
Humedad del combustible que entra a planta	% m/m	30	
Tonelada año disponibles A un 45 % b.h. de humedad	t/año	6.870	4.335,5
PCI del combustible A la humedad entrada a planta	MJ/kg	12,49	
Energía primaria al año	MWh	18.734	11.823
Energía eléctrica al año	MWh	4.047	2.554
Horas de funcionamiento de la planta	h	7.884	
POTENCIA ELÉCTRICA INSTALABLE	MW	0,51	0,32

Tabla 41 Potencia eléctrica instalable en la zona del macizo del Car

En cualquiera de los escenarios planteados la potencia que sería posible instalar no justifica la inversión necesaria para la instalación de una central eléctrica alimentada únicamente con los recursos de la zona analizada.

5.3 VARIABILIDAD DE LOS RESULTADOS EN FUNCIÓN DE LAS HIPÓTESIS DE TRABAJO

Si bien las hipótesis de trabajo sobre el valor del poder calorífico y la humedad de entrada a planta son simplistas, ya que en la zona hay presencia de otras especies y la humedad del material a la entrada a caldera es variable a lo largo del año, los resultados obtenidos son coherentes. De hecho, las conclusiones finales no se modifican al tomar para el poder calorífico y la humedad otros valores razonables, como se comprueba en los subapartados siguientes. Se incluye también un estudio de las modificaciones que sufrirían los resultados al considerar valores de toneladas año disponibles dentro de un rango que comprende los escenarios considerados.

5.3.1 Variabilidad de los resultados en función de las toneladas año disponibles

Si se varía la disponibilidad de biomasa en un rango que oscila entre 3.000 y 7.500 t/año (incluye los escenarios considerados) se observa cómo los valores de potencia inestable varían entre 0,22 MWe y 0,56 MWe (Figura 57). Resultados que difieren de los obtenidos pero que no modificarían la decisión de instalar o no una central eléctrica en la zona.

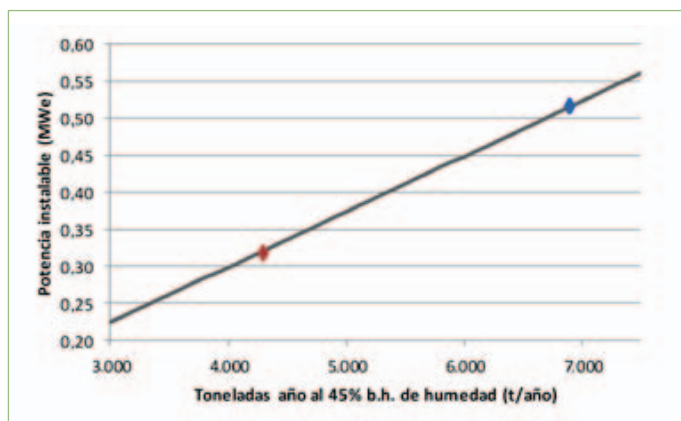


Figura 57. Variación de la potencia inestable en función de las toneladas año disponibles

NOTA: Los puntos indican el valor de los resultados con las hipótesis realizadas. El punto azul indica el resultado para el escenario 1 y el rojo para el escenario 2

5.3.2 Variabilidad de los resultados en función del valor del PCI considerado

En la Figura 58 se presenta la variación de la potencia inestable en función del poder calorífico teniendo en cuenta la existencia de otras especies en la zona. Se toman como valores del rango de variación los datos más extremos que se tienen (datos propios) de valores de poder calorífico para las especies existentes en la zona. Así, el valor extremo mínimo sería considerar todo el combustible con el poder calorífico de material de una quercinea ($PCI_p = 11,14$ MJ/kg a un 30 % b.h de humedad) y el valor extremo máximo el de material de un pino ($PCI_p = 13,26$ MJ/kg a un 30% b.h de humedad). Se recuerda también que el valor del poder calorífico de una especie no es un valor fijo y que existe cierta variabilidad en función de la cantidad de hojas, ramas de distinto tamaño o fuste que se incluya en el combustible y de la tierra de contaminación externa que se incorpore en el proceso de obtención del material. La diferencia entre valores extremos es de 0,08 MWe en el caso del escenario 1 y 0,05 MWe en el caso del escenario 2. Son variaciones que no modificarían la decisión de la implantación o no de una central eléctrica

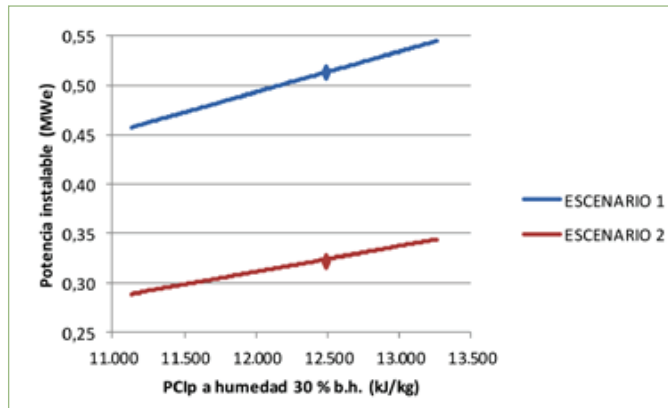


Figura 58. Variación de la potencia instalable en función del PCI

NOTA: Los puntos indican el valor de los resultados con las hipótesis realizadas

5.3.3 Variabilidad de los resultados en función del valor de la humedad considerado

Si se varía el valor de la humedad media del combustible a la entrada a planta los resultados apenas sufren variaciones tal y como puede observarse en la Figura 59. La diferencia de potencia obtenida entre los valores extremos es de apenas 0,02 MWe en el caso del escenario 1 y 0,01 para el escenario 2. Estos resultados no son determinantes a la hora de decidir la implantación o no de una central eléctrica.

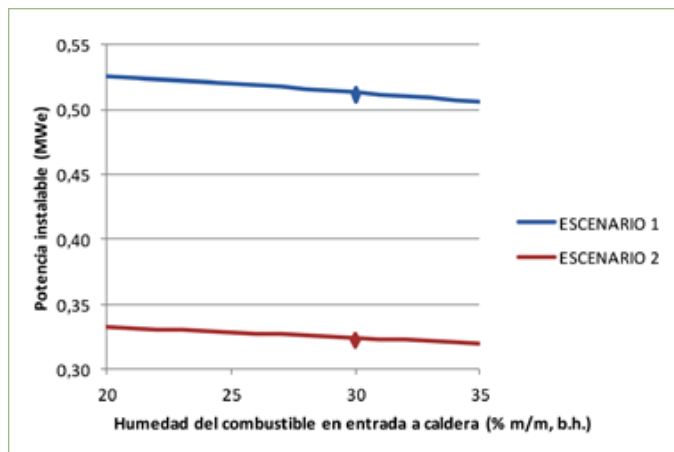


Figura 59. Variación de la potencia instalable en función de la humedad media del combustible que entra a caldera

NOTA: Los puntos indican el valor de los resultados con las hipótesis realizadas

5.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se enumeran a continuación las conclusiones más relevantes.

- La potencia eléctrica instalable en la zona en el mejor de los escenarios (todo el material forestal disponible se destina a combustible) es de 0,51 MWe y considerando un escenario más conservador (parte se destina a uso maderero) es de 0,32 MWe.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos no es posible la instalación de una central eléctrica alimentada únicamente con el material forestal existente en la zona estudiada
- Modificaciones en las hipótesis realizadas en cuanto al PCI del combustible, la cantidad de biomasa disponible y la humedad de consumo en planta no modifican la conclusión alcanzada.

5.5. OTRAS BIOMASAS COMPLEMENTARIAS

Como acabamos de comprobar, con la biomasa forestal obtenida de la zona de estudio, no es posible la instalación de una central termoeléctrica de biomasa, debido al alto coste que tendría.

Una posibilidad sería buscar fuentes alternativas de biomasa en las zonas aledañas.

Recurriendo a los montes situados en la zona comprendida entre Requena y Cortes de Pallás y a los montes del oeste de Ayora, se podrían obtener 30.000 t más. Con estas toneladas, se podría ya optar a una central termoeléctrica de 4 MW, pero su rentabilidad seguiría siendo muy baja o nula.

Para completar esta biomasa forestal, y conseguir que la planta tenga una mayor rentabilidad y por tanto una mayor seguridad del negocio a largo plazo, se plantea un escenario de duplicar el suministro de combustible basándonos en cultivos energéticos. De esta manera tendríamos un mix de biomasa con un total de 70.000 toneladas, 50% cultivo energético y 50% residuo forestal que nos permitiría la instalación de una central de 10MWe.

Para esta cantidad de combustible, las 35.000 toneladas provenientes de los cultivos, se necesitarían alrededor de 1.400 hectáreas de terrenos de regadío. Se descarta la huerta valenciana debido a la fuerte competitividad que tiene los cultivos para régimen de consumo humano. Las zonas susceptibles de implantación de estos cultivos serían los municipios de:

Municipios	Superficie regadío [has]
Almansa	1.590
Caudete	2.900
Corral Rubio - Yecla	13.900
Ontur-Albatana-Fuente Álamo	2.500
Mancha Oriental	107.000

Tabla 42. Superficie susceptible de implantación de cultivos energéticos

Teniendo en cuenta ahora el origen del combustible, la localización para la instalación de la central no podría ser Enguera al situarse a una distancia levada de las fuentes de suministro, sino que habría que buscar una ubicación más cercana a éstas, como podría ser Ayora o a algún municipio aledaño.

6

- Almacenamiento de Biomasa

6. ALMACENAMIENTO DE BIOMASA

Las plantas de biomasa necesitan disponer de combustible almacenado para su abastecimiento. La cantidad de material almacenado dependerá tanto de las necesidades de combustible de la planta, como de la frecuencia y fiabilidad de las entregas por parte de los proveedores. Además, durante el periodo de almacenamiento se produce un secado natural de la biomasa que mejora su combustión. Además de almacenarse en planta, el combustible puede almacenarse en almacenes intermedios y en campo. Cada tipo de almacén tiene sus características.

A la hora de diseñar el almacenamiento hay que tener en cuenta el espacio disponible, las condiciones ambientales del lugar del almacenamiento y las características del material a almacenar:

- Tipo de combustible: herbáceo, leñoso o residuos industriales (restos de almazaras y extractoras de vino).
- Características: principalmente el tamaño de las partículas y la humedad.
- Forma en la que llegan a la planta: astillado, empacado o en bruto.

En este informe se muestran, a partir de una amplia revisión bibliográfica y de experiencias propias mediante ensayos de almacenamiento realizados en campo, las distintas características de los materiales forestales a almacenar y su comportamiento en función de estas características y de las condiciones ambientales de almacenamiento (apartado 61). Finalmente se realizan una serie de recomendaciones respecto a las estrategias a seguir, teniendo en cuenta además, la información obtenida en empresas que realizan almacenamiento de biomasa.

6.1. ALMACENAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL ASTILLADA

El astillado puede llevarse a cabo con diferentes tipos de materiales según el tiempo que ha pasado desde la corta, por lo que se puede tener material astillado en verde (recién cortada la biomasa) o astillado de madera seca (después de varios meses cortada), lo que hace que las propiedades del material varíen. Si se parte de madera verde, se mejora el astillado y se reduce el desgaste de las cuchillas, pero por el contrario, se producen mayores degradaciones en la biomasa y la introducción de otros materiales como ramillas y hojas, que tienen una mayor proporción de cenizas (lo cual penaliza su poder calorífico).

El almacenamiento de astillas lleva asociado una serie de causas y efectos que en muchas ocasiones se confunden. Así, un aumento de la temperatura hasta un cierto nivel, provoca un aumento del número de microorganismos presentes en el combustible almacenado. Pero a su vez, este aumento del número de microorganismos provoca un aumento de la temperatura. Es por tanto difícil separar causa de efecto y además se entremezclan los efectos. Se ha hecho un esfuerzo por presentar de forma separada y clara los fenómenos, para poder extraer conclusiones sobre el mejor manejo del material almacenado en pilas de astillas.

Una alternativa al almacenamiento de astillas húmedas puede ser el pelletizado o el secado forzado de las astillas, de forma que pasaríamos a almacenar un material con humedades muy bajas, evitando así los problemas ocasionados del almacenamiento. Se han estudiado estos dos casos, cuyos resultados se presentan en los Anexos II y III respectivamente, pudiendo concluir que ambos sistemas presentan un coste adicional cuyos beneficios generalmente no son tales que hagan que el gasto compense.

6.1.1 Evolución de la temperatura

El control de la temperatura de las pilas es necesario ya que esta variable tiene tanto efectos negativos como positivos. Los efectos negativos son la pérdida de combustible por descomposición y posibles autocombustiones. Por otra parte, el efecto positivo se debe a que el calentamiento de la pila favorece el proceso de secado natural, obteniéndose una mejora en la combustibilidad del material. En este caso, si se quiere conseguir un secado natural en pilas de astillas, debe favorecerse el aumento de temperatura de la pila de forma controlada para que no se llegue a la autocombustión.

Los incrementos de temperatura son consecuencia de un balance entre la producción y la pérdida de calor en la pila [1]. La evolución de la temperatura viene regulada por una serie de procesos termogénicos (reacciones bióticas y abióticas), por la pirolisis así como por efectos derivados de la circulación de aire en el interior de la pila.

En estudios realizados en el marco del proyecto LIGNOCROP [2] con *Populus nigra* y *Populus Canadiensis* en clima continental mediterráneo se observó un aumento de temperatura en almacenamiento a pequeña escala de material astillado de hasta 60°C, y en el caso de pilas o gran almacenamiento cercanos a los 65°C. Estos incrementos pueden ser de hasta 65°C después de tan solo 2 semanas, dependiendo de los factores que afectan a la velocidad de calentamiento como son: la altura de la pila, el coeficiente superficie-volumen, la edad de las astillas, tamaño de las astillas, las pérdidas de calor por convección, el índice de radiación solar, la presencia de impurezas (madera degradada o serrín) y la compactación de la pila [3].

Sobre factores como altura de la pila, coeficiente superficie-volumen, tamaño de las astillas, compactación y presencia de impurezas se puede intervenir para conseguir un secado del material minimizando las pérdidas de materia seca. En este apartado se estudia cómo influyen estos últimos factores para poder establecer estrategias de manejo del material almacenado, prestando especial atención a la altura de la pila y al tamaño de partícula, por ser los más importantes.

6.1.1.1 Altura de la pila

En la Figura 60 se muestran los resultados de un estudio llevado a cabo por Jirjis [4] en el que se puede observar la influencia de la altura de las pilas en su calentamiento. La pila de 6 m alcanza una temperatura de 63°C en tan sólo 8 días, se estabiliza durante 2 meses a 60°C y después empieza a descender lentamente. Sin embargo, en la pila de 3 m la temperatura durante las dos primeras semanas es similar a la ambiental (alrededor de 0°C en dichos experimentos) y después sube hasta 60°C. Los datos no permiten observar si tras ese calentamiento se produce una disminución de la temperatura porque no se continuó con la toma de datos [4].

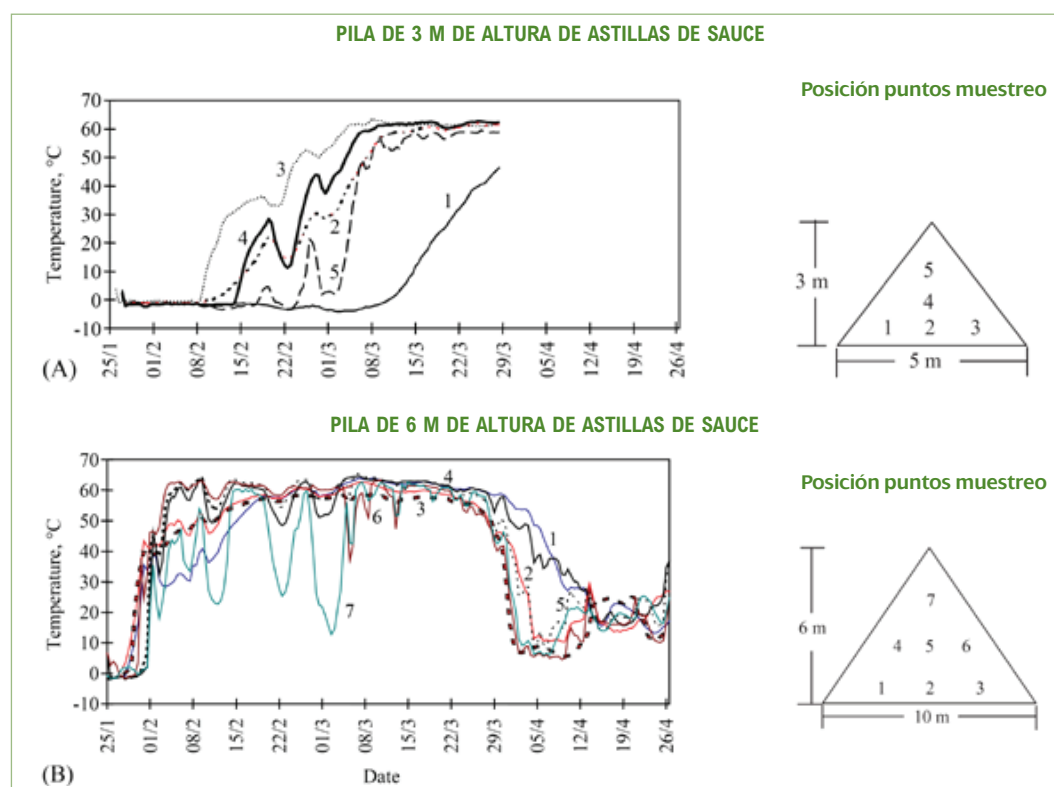


Figura 60. Temperatura medida durante el almacenamiento de pilas de astilla de sauce de 3 m y 6 m de altura. Las temperaturas se toman a distintas profundidades de las pilas [4].

En estudios realizados por Fuller [5] se observa como incrementos significativos en la altura de la pila conllevan a su vez incrementos en la temperatura.

6.1.1.2 Tamaño de partícula

La temperatura alcanzada dentro de la pila también está influenciada directamente por el tamaño de las astillas. En las astillas de menor granulometría las reacciones biológicas y químicas son más intensas ya que estas reacciones se producen en la superficie y al ser las astillas más pequeñas hay mayor relación superficie-volumen [1]. Además, la disipación de calor es menor debido a que se dificulta el flujo de aire, por lo que el calentamiento de la pila es mayor. En el estudio de Idler et al. [6] (Figura 61) se observa claramente la influencia del tamaño de las astillas en el calentamiento de las pilas. En el estudio se almacenó biomasa de sauce, chopo y pino con diferentes longitudes (de 16 mm (astillas) a 6.000 mm (árboles enteros)). Las astillas (< 30 mm “*fine chips*”, 31-50mm “*middle size chips*”, 51-100 mm “*coarse chips*”) y los trozos (“*chunks*” 100-200 mm) se almacenaron en recipientes rectangulares de 2,5 m de altura y 2m de ancho, y durante el período de ensayos estos recipientes estuvieron protegidos de la lluvia y construidos con un fondo de madera de forma que eran permeables al aire.

Como se observa en la Figura 61, en poco más de una semana las pilas de astillas más finas (< 30 mm) (líneas 1, 2, 3 en la Figura 61) alcanzaron alrededor de 60°C, mientras que las pilas hechas con trozos de madera más grandes (100-200 mm) (línea 4 Figura 61) prácticamente se mantuvieron a temperatura ambiente. Pasados dos meses de almacenamiento la temperatura de las pilas empieza a bajar de forma continua hasta acercarse a la temperatura ambiente [6]. Aunque no aparece en la Figura 61, en el artículo de Idler et al. [6] se comenta que las astillas más gruesas (51-100 mm, coarse chips) alcanzan temperaturas inferiores a los 50°C y se mantienen a esta temperatura durante un periodo de tiempo más corto que las astillas finas. Se observa como a medida que se aumenta el tamaño de las astillas las temperaturas que alcanzan son menores, llegando hasta los trozos (100-200 mm) para los que no se aprecia prácticamente un aumento de temperatura debido al apilamiento. Podría parecer que según lo comentado al principio de este subapartado no resulte interesante el almacenamiento de trozos de madera, ya que al no aumentar la temperatura en el interior de la pila no se conseguiría el secado, pero esto no es cierto ya que en este caso, y como se comentará en el subapartado siguiente (6.1.2 evolución de la humedad), el secado se consigue por aireación, por el contacto entre el aire más seco con la madera más húmeda.

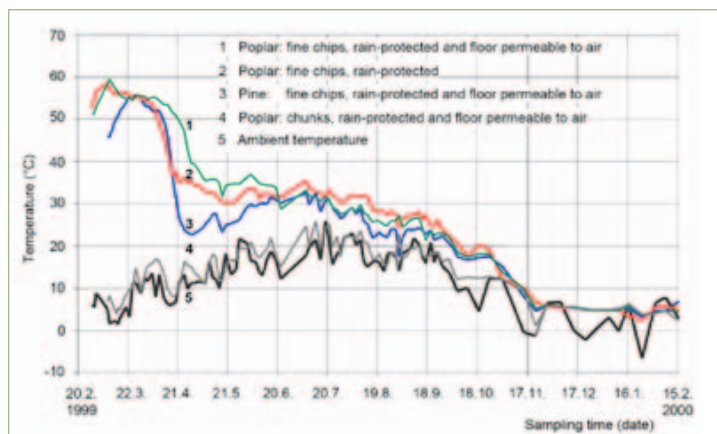


Figura 61. Cambios en la temperatura en pilas (protegidas de la lluvia) de diferentes clases de madera astillada o en trozos [6].

Otras experiencias corroboran los resultados mostrados hasta ahora. En experiencias llevadas a cabo por Thörnqvist, y referenciadas por Wihersaari [7], se muestra como con astillas de 8mm, la temperatura aumenta rápidamente hasta 60°C; cuando las astillas son de 30mm, la temperatura aumenta hasta los 40-50°C; y cuando las astillas son de 70mm, la temperatura no sube de 30°C.

En estudios propios realizados con material procedente de *Populus* en cultivo energético se comprobó un aumento sustancial de temperatura en el material astillado (aprox. 5 cm) hasta los 60°C en los primeros días de almacenamiento, mientras que el material tronzado (aprox. 50 cm.) no superaba los 30 °C [2].

6.1.1.3 Distribución de temperaturas en el interior de la pila

En el análisis realizado, se han presentado temperaturas medias de pila, sin embargo las temperaturas que se alcanzan en las distintas zonas de una pila no son uniformes. Estudios realizados por la UCLM con material procedente de frondosas (*Populus*) [2] muestran un perfil diferenciado de temperaturas a lo largo de la pila de astillas, similar al representado en la Figura 62 obtenido a partir de un modelado realizado por Garstang et al. [8].

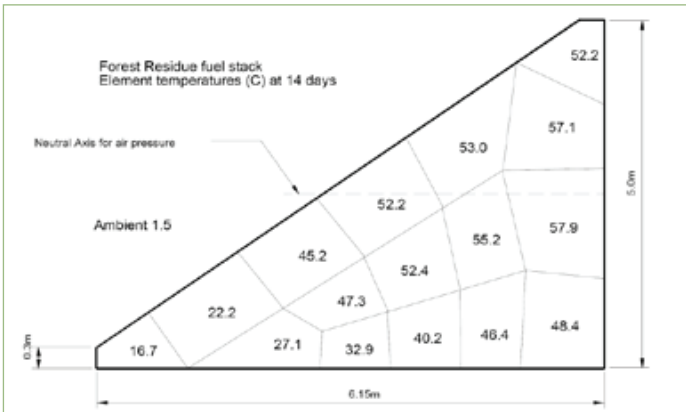


Figura 62. Modelo del perfil de temperaturas en una pila de astillas de residuos forestales almacenados durante 14 días [8].

Este perfil simula las diferentes temperaturas que se alcanzan en las distintas partes de la pila. Como se observa en la figura, la zona que permanece más fría es la que está directamente en contacto con el suelo y en la parte cercana al extremo inferior de la pila. La capa superficial está más fría en las partes bajas y se va calentando según se va ascendiendo. Esto es debido a la convección del aire dentro de la pila, que hace que la parte superior esté más caliente. Durante el secado de las astillas en montones o pilas se produce el llamado “efecto chimenea”, cuya dinámica es la siguiente (Figura 63). El aire penetra en las pilas desde la superficie y enfría los residuos a la vez que se recalienta según avanza hacia el centro del montón; la corriente de aire arrastra el agua contenida en los materiales, produciéndose así un flujo de aire húmedo y cálido desde el interior de los montones hacia la cumbre. De esta forma el agua fluye verticalmente y se acumula en la cúspide donde se experimenta un fuerte recalentamiento y salida de vapor a la atmósfera. El recalentamiento se ve favorecido por la acumulación de microorganismos arrastrados por el flujo de aire, con el que se acelera el incremento de población microbiológica y, por lo tanto, la actividad termo genésica. La salida de vapor a la atmósfera produce una impresión de humeo de la cúspide de los montones, lo cual de nombre a este fenómeno (efecto chimenea) [9].

La zona que registra las mayores temperaturas es la parte central, ya que se dificulta la convección del aire y se acumula tanto el calor que se genera en esa zona, como el calor que proviene de capas inferiores.

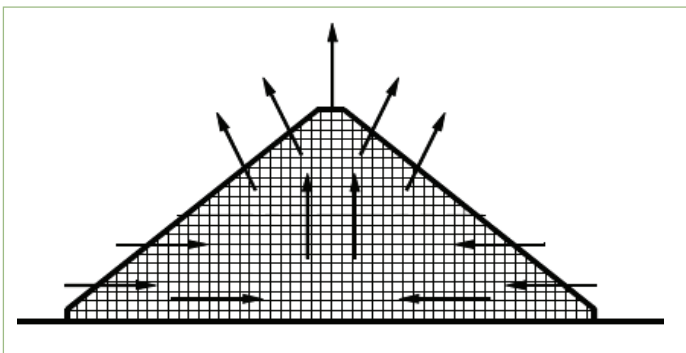


Figura 63. Circulación de aire en el interior de una pila [8].

6.1.1.4 Control de la autocombustión

En primer lugar debe tenerse en cuenta que el fenómeno de autocombustión se ve favorecido cuando las pilas de astillas tienen gran cantidad de corteza, cuando sobre la superficie se forman costras de hielo o cuando se acumulan materiales finos que obturan los huecos e impiden el intercambio de calor con la atmósfera [9] a través de la convección de aire (Figura 63). Así se deberá controlar más la temperatura en pilas en las que se den algunas de las circunstancias enumeradas anteriormente.

Si en las pilas se alcanzan los 65°C, los carbohidratos de la madera empiezan a degradarse químicamente formando ácidos grasos volátiles (ver apartado 6.1.5). Si la temperatura sigue aumentando y supera los 70°C, aumenta mucho el riesgo de auto ignición. Por tanto hay que controlar la temperatura en el interior de las pilas y evitar que sobrepase los 65°C. Para ello se puede favorecer la circulación del aire en el interior de una pila acentuando el efecto chimenea. Esto se favorece si la pila es alta y estrecha en la base [1]. Una vez construida la pila se debe controlar la temperatura de la misma y cuando se registran temperaturas superiores a los 60°C actuar sobre la pila volteándola o descabezándola [10].

Los estudios realizados por la UCLM con material astillado de frondosas [2] indicaban que el aumento del tamaño de partícula del material almacenado permite un almacenamiento con menores riesgos de auto-combustión (trozas frente a astillas). En el experimento realizado, en el que se almacenaron partículas de gran tamaño (trozas de 150 a 400mm de largo), en ningún caso alcanzaron temperaturas de riesgo. Este efecto es debido a la buena circulación del aire entre las partículas. Además, la degradación del material almacenado en trozas es menor que la de material almacenado en astillas. En el almacenamiento con cubierta se registran valores de temperatura superiores (mayor riesgo de autocombustión) que en el caso de almacenamiento sin cubierta, pero esto a su vez se traduce en un mayor secado en la zona exterior (evitando el re-humedecimiento de la pila tras los eventos de precipitación).

Como conclusión del apartado se destaca que el calentamiento de las pilas es un fenómeno que puede ser utilizado positivamente si se hace un seguimiento de las condiciones existentes en el interior de los montones y, mediante un manejo adecuado, se favorece el incremento térmico. Actuando de esta manera se consigue extraer el agua desde el interior de las piezas de astillas hasta la superficie de las mismas, con lo que se facilita su posterior evacuación a la atmósfera y la consiguiente desecación del producto residual.

6.1.2 Evolución de la humedad

Normalmente, la biomasa residual y forestal presenta un elevado contenido en humedad, lo que plantea una serie de problemas para su utilización con fines energéticos. Este elevado contenido en humedad, además, dificulta el almacenamiento de la biomasa ya que favorece la proliferación de microorganismos que degradan la madera. Para evitar estos problemas durante el almacenamiento, se debe facilitar la circulación de aire en el interior de la pila para así mejorar el secado. Este secado natural, a su vez, mejora las condiciones de la biomasa para ser utilizada como combustible.

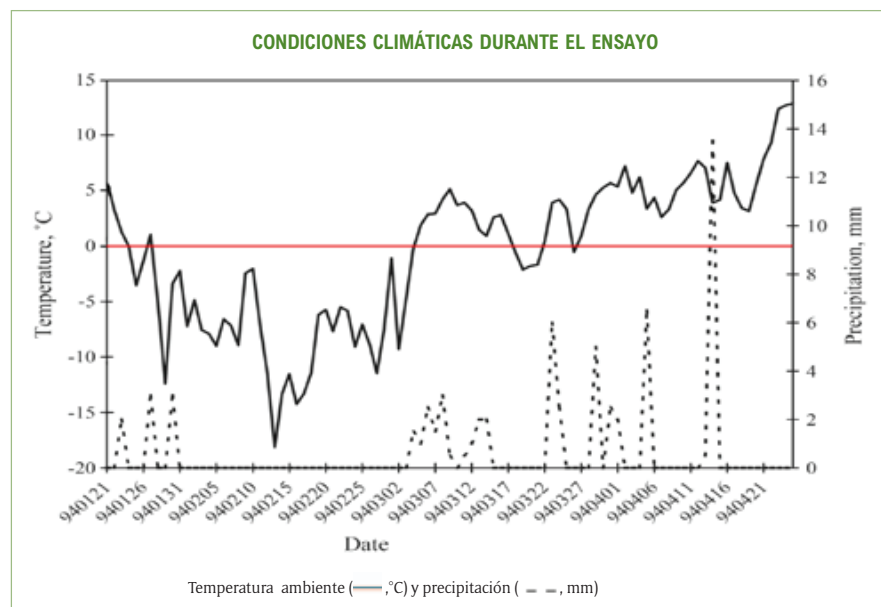
Los factores que determinan la eficacia del secado natural de los montones de astillas son: la humedad inicial, la humedad ambiental, la distribución de las temperaturas, el régimen de precipitaciones, las heladas, el viento, la exposición (solano, umbría) y el grado de insolación. El secado también depende del tamaño y forma de las pilas, la granulometría y la clase de madera. Si se hacen grandes montones de astillas, entran además una serie de factores nuevos debido a las condiciones ambientales especiales que se producen en la parte interior de la pila, al estar esta zona aislada de la influencia ambiental del exterior, que sólo afecta a una capa superficial de astillas. Se estudian a continuación algunos de los factores sobre los que se puede intervenir para controlar el proceso de secado del material en una pila de astillas y que son la altura de la pila y el tamaño de partícula.

Los estudios realizados por la UCLM con astillas [2] indican que la pérdida de humedad se produce en los primeros estadios del almacenamiento y por tanto, a raíz de los resultados obtenidos, se recomendaría que la cubierta (ya que produce una menor velocidad de secado y mayor pérdida de materia seca) se instalase pasado un periodo de pre-secado de las astillas (para facilitar la eliminación del contenido en humedad propio) y únicamente en épocas de riesgo de precipitaciones, para evitar el re-humedecimiento de la astilla una vez pre-secada.

6.1.2.1 Altura de la pila

Se presentan dos estudios en los que se evalúa el efecto de la altura de las pilas en la evolución de la humedad. En ambos casos se concluye que el secado es mayor en pilas de mayor altura.

En el estudio de Jirjis [4] (incluido en apartado 6.1.1, Figura 60) se estudió la evolución de la humedad en pilas de diferentes tamaños (3 y 6 metros de altura) con una humedad inicial de las astillas entre el 52 y el 55%. En la Figura 64 se muestra la evolución de la humedad en las pilas de astillas de 3m y 6m de altura tomada en varios puntos de muestreo junto con las condiciones ambientales durante el almacenamiento. De forma global, considerando humedades medias de las pilas, se observa que la pila de 3m de altura se encuentra siempre más húmeda que la pila de 6 m. En la pila de 3m la humedad en la cumbre de la pila (punto de muestreo nº 5) aumentó con el tiempo y llegó al 63% al final del periodo de almacenamiento, mientras que en el resto de la pila disminuyó. Este aumento en la humedad en la cubrera de la pila es debido a la condensación del vapor que arrastra el aire caliente que asciende por el interior de la pila (efecto chimenea ya comentado anteriormente). Al final del periodo de almacenamiento la humedad media considerando todo el material era de alrededor del 53%. En la pila de 6m de altura se midió un descenso moderado de la humedad durante los 2 primeros meses y un descenso fuerte en el último mes en las zonas bajas de la pila. En estas capas bajas (puntos de muestreo 1, 2 y 3) se alcanzó una humedad por debajo del 40%, mientras que la zona alta (punto de muestreo 7) primero se secó hasta un 45% para después humedecerse, alcanzando un 63%, coincidiendo con un periodo de lluvias. La humedad media de la pila después de 3 meses de almacenamiento fue del 43%, inferior por tanto a la de la pila de 3 m de altura.



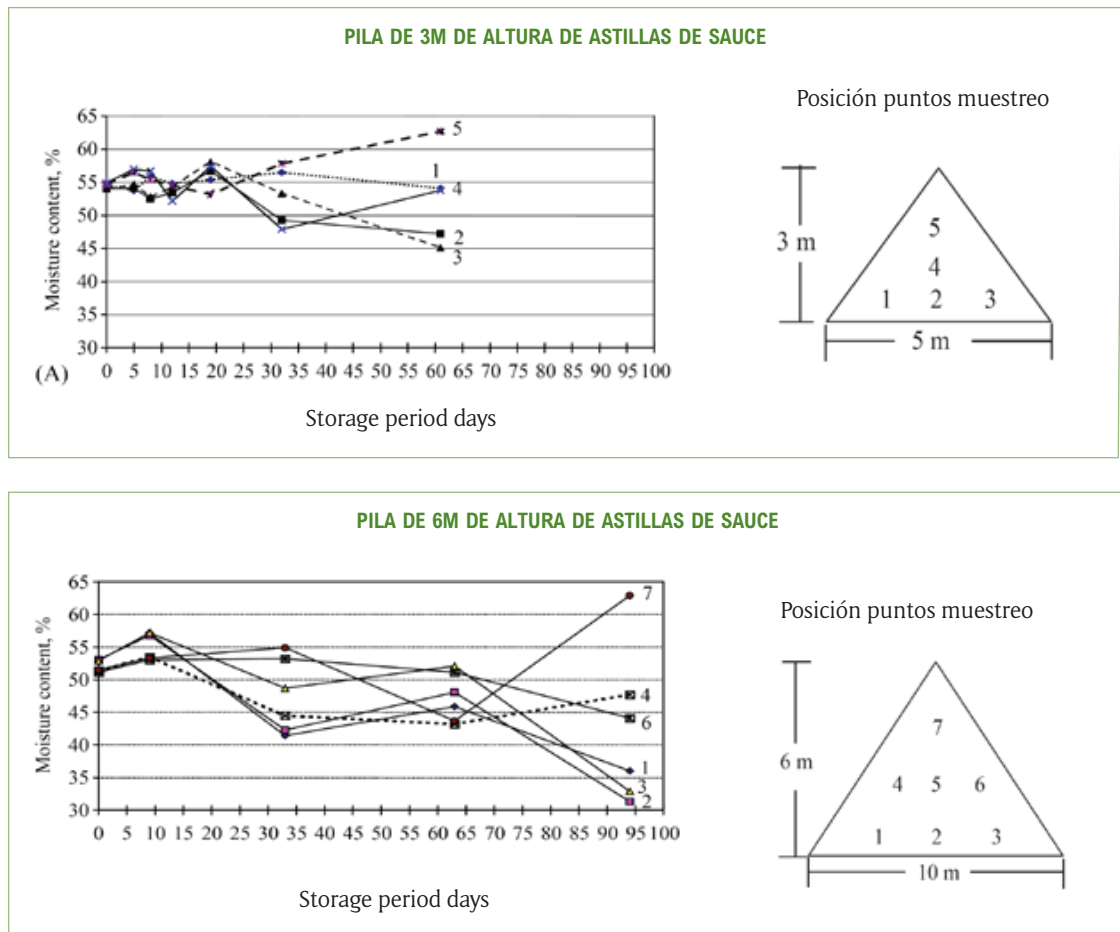


Figura 64. Evolución de la humedad, medida en diferentes puntos de muestreo, en pilas de sauce [4].

En otro estudio llevado a cabo por Gargant et al. [8], se evaluó la distribución de humedades en las pilas a distintas profundidades y se concluyó que una manera de disminuir la humedad media de la pila consistía en aumentar la altura de la misma. En dicho estudio se construyeron 2 pilas, una de 4,5 m de altura hecha con astillas de residuos forestales (principalmente haya), y la otra de 5 m de altura hecha con astillas de sauce provenientes de cultivos de corta rotación (SRC). Ambas pilas se situaron a la intemperie sobre suelo asfaltado. En la Figura 65 se muestran las gráficas del comportamiento de la humedad en las dos pilas a distintas profundidades junto con un gráfico del promedio de lluvia mensual durante el almacenamiento. Las humedades iniciales de las astillas fueron de alrededor de un 52% b.h. para las astillas de sauce de SRC (cultivos de corta rotación) y un 40% b.h. para las astillas de residuos forestales.

El resultado de la medida de humedad a diferentes profundidades de la pila muestra que las pilas están divididas en dos zonas, la zona central y la zona superficial. En la pila de residuos forestales el contenido en humedad a 3,0 m y 1,5 m baja hasta el 30% después de 30 días y permanece alrededor de estos niveles durante el resto del estudio. En la pila de astillas de SRC la humedad fue más errática, pero también descendió hasta el 30% a una profundidad de 1,5 y 3,0 m. Sin embargo, en la capa superficial de ambas pilas (que está muy afectada por las condiciones climáticas) la humedad aumentó hasta el 60%. Está claro, por tanto, que la capa superficial de ambas pilas permanece húmeda, mientras que la zona central alcanza una humedad menor que la inicial. Así, aumentando la proporción de material situado en la zona central se puede conseguir que el valor medio de humedad de toda la pila sea menor. En las pilas que se utilizaron en el estudio de Gargant y colaboradores [8] el límite entre la capa superficial húmeda y la zona central seca varía entre 1,0 m y 1,5 m de profundidad, dependiendo de la meteorología. Tomando un valor medio constante para la profundidad de la capa superficial se puede aumentar el porcentaje de material situado en la zona central aumentando la altura de la pila.

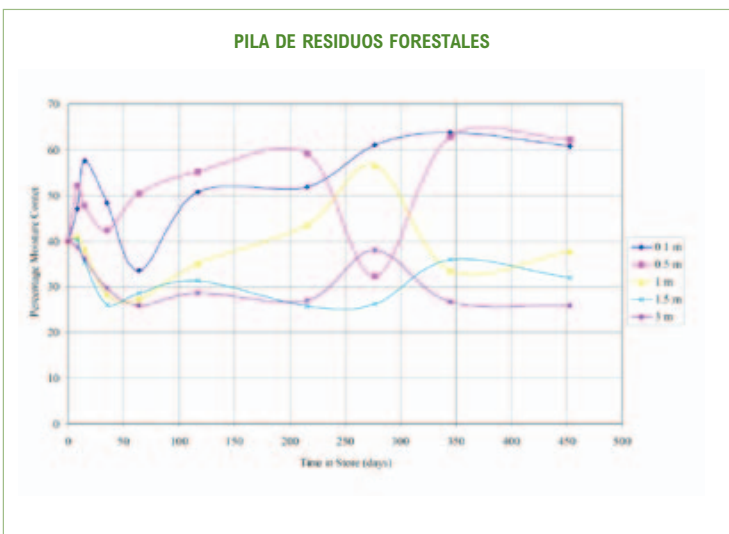
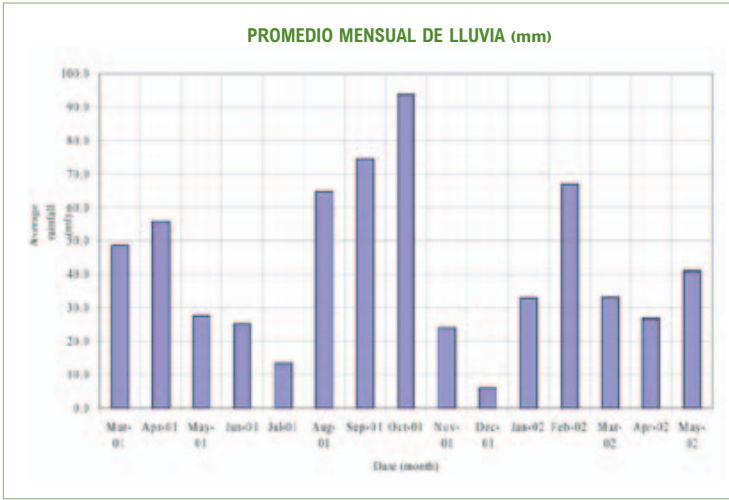


Figura 65. Porcentaje de humedad medida a diferentes profundidades en pilas de astillas de biomasa forestal a lo largo del tiempo de almacenamiento [8].

En la Tabla 43 y Figura 66 se muestra como varía la proporción de área central respecto al área total al variar la altura de la pila asumiendo que el límite entre la zona central y la capa superficial se mantiene constante en 1,25 m.

	Pila completa				Capa superficial (m)	Región central			% de la pila que es zona central (%)
	Ángulo (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	
SRC	39	5,0	11,3	30,9	1,25	3,8	9,3	17,4	56
Residuos forestales	37	4,5	11,9	26,9	1,25	3,3	8,6	14,0	52

Tabla 43. Ejemplo del porcentaje de área de zona central respecto al área total de la sección transversal de la pila [8]

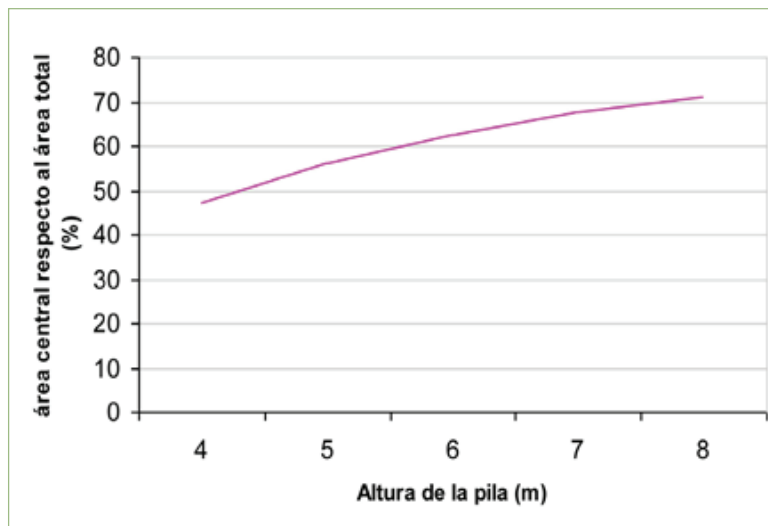


Figura 66. Porcentaje de área central en relación con la altura de la pila.

La Figura 66 muestra el efecto de aumentar una pila de 4m hasta 8m. Según la tendencia mostrada deberían realizarse las pilas lo más altas posibles, pero, según Gargang et al. [8], a medida que se aumenta la altura se reduce la disipación de calor y se favorecen los problemas asociados a este fenómeno, como el riesgo de auto combustión, por tanto no aconsejan la construcción de pilas muy elevadas y sitúan un límite de altura razonable en 10m. Baldini [11] sitúa este límite en 7m para países cálidos. Estas alturas respetan las restricciones impuestas por el RD 2267/2004 sobre seguridad contra incendios en establecimientos industriales [12] que establece que la altura máxima de las pilas para establecimientos del tipo que competen a este estudio no deben superar los 15m de altura. Cambiando la forma de las pilas a una forma trapezoidal, se puede incrementar la fracción central, pero se aumenta la infiltración del agua de lluvia en la cima de la pila.

6.1.2.2 Tamaño de partícula

Como se ha dicho, el tamaño de las partículas también influye en el secado de la biomasa. En el estudio de Idler et al. [6] se muestra el secado de pilas de biomasa de diferentes tamaños de partícula a lo largo de 1 año. La humedad inicial estaba alrededor de 50 – 60%. Después de 6 o 7 meses de almacenamiento la humedad de las pilas de astillas (líneas 2, 3 y 4 de la Figura 67) permanece más o menos constante alrededor del 40%, mientras que la pila de trozos de madera de chopo (línea 1 Figura 67) se secó hasta el 30% en 7 meses y casi llegó al 20% tras 1 año de almacenamiento. Todas estas pilas estaban protegidas de la lluvia. Los trozos más grandes se secan más fácilmente porque, al quedar más huecos entre el material, se favorece la circulación de aire en el interior de la pila.

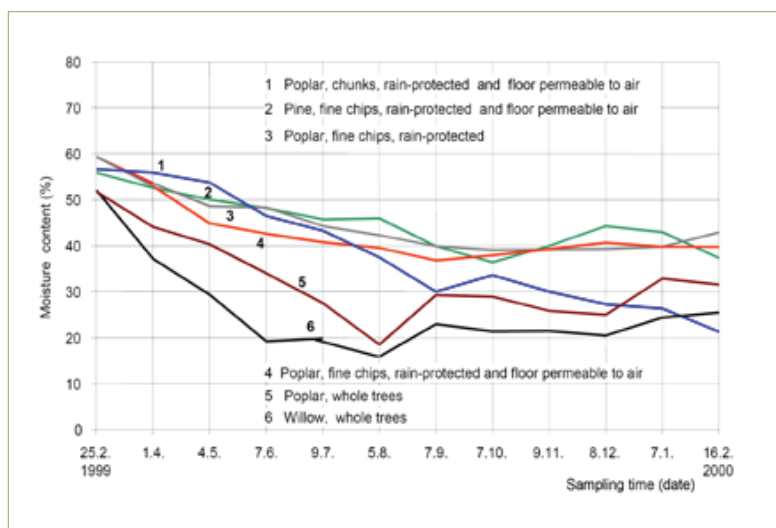


Figura 67. Curva de secado de pilas de biomasa de diferentes clases [6].

También se observa en la figura como las pilas sin proteger de la lluvia de árboles enteros de pequeño diámetro, Φ medio 18 mm para sauce y Φ medio 40mm para chopo (líneas 5 y 6 de la Figura 67), alcanzan rápidamente (entre 4 y 5 meses) humedades incluso por debajo del 20% b.h.. Durante el ensayo que llevaron a cabo los autores estos árboles vuelven a humedecerse sin superar en exceso el 30% b.h. de humedad durante el periodo de almacenamiento.

Estudios realizados en el marco del proyecto LIGNOCROP [2] con astillas de *Populus* con cubierta y sin cubierta indican un descenso de la humedad a lo largo de 150 días de ensayo, siendo este más pronunciado en la primera mitad del ensayo, independientemente del uso de cubiertas o no.

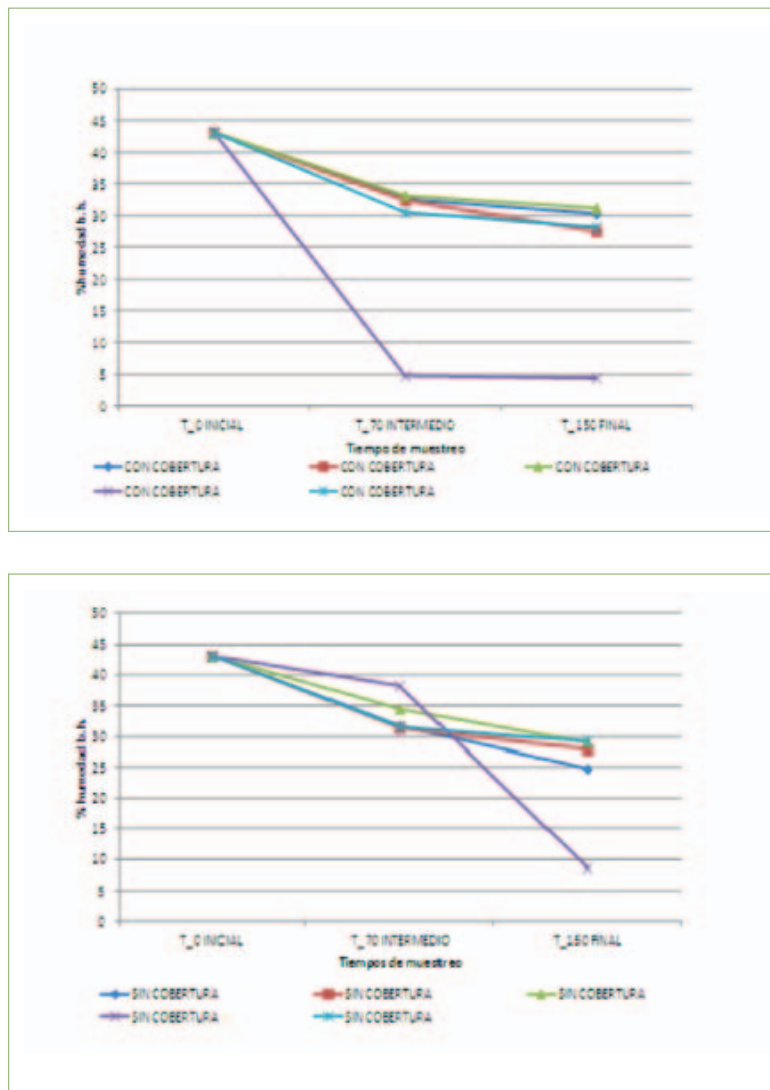


Figura 68. Contenido en humedad analizada en laboratorio para las diferentes bolsas en pila de astillas en 3 tiempos de muestreo [2].

Otros estudios llegan a las mismas conclusiones y observan que al aumentar el tamaño de las astillas, hasta tener trozos, mejora el secado del material [10][13] y encuentran también que se consigue el mejor secado con árboles enteros [13] todo ello en pilas sin proteger de la lluvia.

Una buena opción si se opta por el astillado es dejar los árboles enteros o material suelto (ramas, copas, cepas etc.) secándose en el monte/campo, o en almacén, en bruto o empacados y astillarlos una vez secos, con esto se consigue tener menos pérdidas de materia seca [10][13][14] y además las astillas que se producen con material seco son más homogéneas [9]. Esta forma de actuar puede verse limitada si hay problemas de ocupación de terreno o de peligro de incendios o propagación de plagas.

6.1.3 Pérdidas de materia seca

La pérdida de materia seca es la pérdida directa de peso o de densidad de la madera como consecuencia de la descomposición biológica y química de las astillas. Estas pérdidas dependen de la humedad inicial del material astillado, de la temperatura que se alcance dentro de la pila, del tamaño de las astillas y de la especie de la madera.

En general, la pérdida de materia seca en la pila en su conjunto está, como promedio, entre el 0,5 y el 1% por mes en climas fríos y templados. Un almacenaje prolongado o en climas calientes y húmedos lleva con frecuencia a pérdidas

de madera del 0,75 al 3% por mes. Las frondosas (y particularmente las frondosas blandas) se descomponen en general con más rapidez que las coníferas, aunque las distintas especies de madera presentan distintas resistencias al deterioro microbiológico [15].

El contenido en humedad de las astillas influye claramente en las pérdidas de materia. En estudios realizados en Suecia, se encontró que las pérdidas de materia seca eran proporcionales a la humedad inicial. Así, humedades iniciales de 42%, 51% y 58%, causaban pérdidas mensuales de 1,1%, 2,2% y 2,6%, y pérdidas totales durante los 6 meses de almacenamiento de 6,6%, 13,2% y 15,6% [7][16][17]. En otros estudios realizados durante 9 meses, las humedades iniciales eran del 32% y 20%, y las pérdidas mensuales fueron de 1,3% y 0,23- 0,35% [7].

Si bien las pérdidas en las referencias anteriores se dan como pérdidas mensuales, realmente la pérdida de materia seca no es uniforme durante todo el periodo de almacenamiento, siendo alta al principio del periodo de almacenamiento, cuando la temperatura sube rápidamente, y posteriormente más lenta. Las pérdidas se estiman en un 3,6% a la semana (medida durante la segunda semana de almacenamiento) y después de estas primeras semanas se estima que la pérdida es de 0,4-0,7% al mes [18][19].

Las astillas almacenadas dentro del margen de temperaturas de 20 a 50°C, muestran frecuentemente mayores pérdidas de madera que las almacenadas de 50 a 60°C. En el almacenaje de verano en climas fríos y templados, las partes más extensamente deterioradas se encuentran con frecuencia en los lados de la pila, mientras que en invierno las pérdidas más elevadas de madera tienen lugar en el centro de la pila. Si están implicados hongos termófilos, y con frecuencia lo están, las temperaturas de unos 50°C son ideales, pudiendo encontrarse también fuertes pérdidas de madera en las partes más calientes de la pila. Dentro de la pila se encuentran, por tanto, grandes variaciones de pérdida de madera, dependiendo en gran medida de los hongos en acción causantes del deterioro. Cuando la temperatura se eleva hasta unos 65°C, la actividad de los hongos es casi nula; sin embargo, las temperaturas elevadas pueden ocasionar el deterioro químico de la madera [15].

El tamaño de las astillas o trozos de material también influye en la pérdida de materia seca, siendo la pérdida menor al aumentar el tamaño del material almacenado como se demostró en ensayos realizados por la UCLM [2] donde en el almacenamiento a pequeña escala (astillas y trozas) provocó una disminución de la calidad del material (aumento de cenizas y finos, y disminución de volátiles, carbono fijo y poder calorífico), efecto que fue más acusado en el caso de astillas que en trozas y a su vez más pronunciada en el caso de usar cobertura, posiblemente debido a la mayor temperatura. Esto también se refleja en el estudio llevado a cabo por Idler et al. [6] y que se resume en la Figura 69. Esta tendencia se corresponde con la encontrada en otras publicaciones referenciadas en el citado trabajo de Idler et al. También se corresponde con un estudio referenciado por Gislerud [20] en el que se observan pérdidas de materia seca de 2,9%/mes para las astillas cubiertas de la lluvia frente a un 0,3%/mes para trozos (de 75 a 150mm) tanto cubiertos como sin cubrir. Sin embargo se ha encontrado alguna publicación en la que esta tendencia no se aprecia [13].

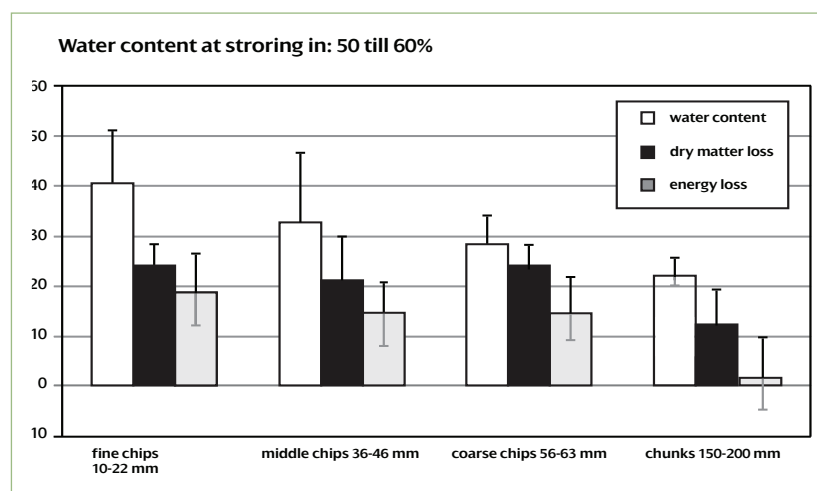


Figura 69. Contenido en humedad, pérdidas de materia seca y pérdidas de energía durante el almacenamiento de astillas de chopo de diferentes tamaños [6].

Las pérdidas de materia seca mencionadas son debidas tanto a descomposiciones fúngicas y microbianas como a descomposiciones químicas. En los apartados siguientes se profundiza en estos procesos.

6.1.4 Descomposición fúngica y microbiana

Los organismos (en su mayoría microorganismos) contribuyen al igual que las propias células vegetales al calentamiento del material, ya que en su respiración o metabolismo generan calor. La actividad microbiana, en especial el desarrollo fúngico, es la principal causa del calentamiento de las pilas de astillas, que a su vez estimula el crecimiento de microorganismos [21]. El aumento de temperatura es debido al efecto de hongos, levaduras y mohos (grupo fungi), y bacterias (grupo mónera) que colonizan las pilas de biomasa. Esta actividad biológica es en gran medida la responsable de la pérdida de materia seca en los montones de astillas. El almacenaje de astillas húmedas en especial recién astilladas favorece el crecimiento de diversos organismos vivos en especial bacterias y hongos. Este hecho se corroboró en estudios realizados por la UCLM, donde se concluye que la humedad inicial de las astillas tiene un efecto más importante sobre la actividad microbiana que la temperatura ambiental [2]. En las siguientes líneas se describen de forma general dichos organismos vivos y las tipologías existentes.

Jirgis [21] indica que el desarrollo fúngico es la principal causa biológica de calentamiento que a su vez estimula el crecimiento de microorganismos. Según Hogland [22] la actividad microbiológica tiene mayor importancia para el rango de temperaturas entre 20 y 60°C. Esta actividad produce pérdidas importantes de materia seca que se traduce en pérdidas económicas.

Según Rugar [23] en su mayoría son mohos y actinomicetos, y se dividen principalmente por las condiciones térmicas en las que crecen y están divididos en 4 rangos con respecto a la tolerancia a la temperatura (Figura 70):

- Los organismos psicrófilos tienen una temperatura máxima de crecimiento en torno a los 20°C [22][23], por lo que la biodegradación se puede dar incluso a temperaturas muy bajas.
- Los organismos mesófilos se desarrollan a temperaturas entre 20 y 50°C [22].
- Los organismos termófilos se desarrollan en temperaturas de 40 a 70°C [22] y temperaturas de crecimiento óptimas por encima de los 45°C [23] (Figura 70). A temperaturas superiores a 70°C la actividad biológica se restringe exclusivamente a bacterias termófilas y dominan los procesos de generación de calor a través de oxidaciones químicas [22].
- A temperaturas superiores se desarrollan los organismos hipertermófilos con temperaturas óptimas de crecimiento iguales o mayores a 80°C [24], y donde dominan los procesos químicos, reacciones exotérmicas y fase de pirólisis [22]. Estos organismos se subdividen a su vez en dos grupos, según tengan su máximo crecimiento a temperaturas más o menos altas (Figura 70).

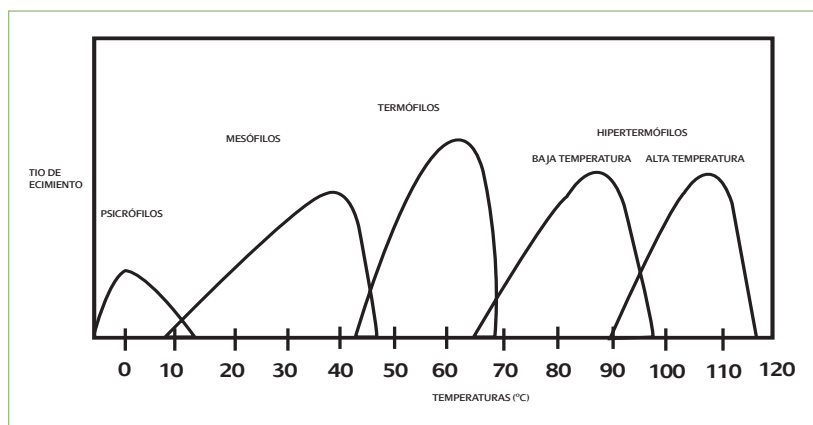


Figura 70. Relación de temperaturas de crecimiento para diferentes organismos y ratios de crecimiento modificado de Rugar [23].

Los organismos que se encuentran dentro de la pila pueden incluirse dentro de las categorías anteriores y ser obligados o facultativos. Los primeros tienen la necesidad de temperaturas bajas para su desarrollo y los segundos las pueden tolerar, esto da idea de lo difusas que son las barreras térmicas entre los diferentes tipos de organismos por lo que los límites son orientativos. Del mismo modo los organismos son capaces de colonizar maderas bajo condiciones aerobias y anaerobias [25]. Las maderas de frondosas son más susceptibles de sufrir putrefacciones que las coníferas ya que estas contienen resinas que disminuyen o impiden la descomposición. La mayor cantidad de carbohidratos solubles y la descomposición de la celulosa favorecen la actividad de los organismos. Como indica Rogers et al. [26] diferentes grupos de organismos, géneros y especies afectan de forma diferente los componentes de la madera (substratos de crecimiento), por lo cual puede existir una afección generalizada en diferentes productos y subproductos.

Por otro lado el papel del nitrógeno en el crecimiento de algunos microorganismos es muy importante ya que es fundamental como sustrato para la descomposición de algunos componentes de la madera. Del mismo modo el nitrógeno de la corteza y el cambium es la fuente de nitrógeno orgánico para el ataque fúngico. El contenido de nitrógeno de la corteza es hasta ocho veces superior al de la madera. Añadir nitrógeno almacenando corteza y serrín favorece la descomposición y la producción de CO₂ [8]. El ataque microbiano de los polímeros de celulosa y hemicelulosa puede estar relacionado con la limitación de nutrientes, especialmente nitrógeno como indica Baeta-Hall et al. [27]. Del mismo modo la degradación de la pared celular de hongos, células muertas bacteriana puede proporcionar una valiosa fuente de nitrógeno, que se encuentra en concentraciones muy bajas en la madera [25]. Así, el nitrógeno de la corteza y el cambium es la fuente de nitrógeno orgánico para el ataque de los diferentes organismos siendo el nitrógeno de la corteza hasta ocho veces superior al de la madera [28]. Los pequeños diámetros de rama aumentan el ratio de corteza y por tanto un ratio superior de nitrógeno [29] y esto a su vez, una mayor descomposición.

6.1.5 Descomposición química

La producción de ácidos grasos volátiles es una parte natural de la descomposición de las astillas almacenadas. Las maderas duras, con más compuestos acetílicos que las maderas de coníferas, pueden producir más ácidos grasos volátiles [8].

Si una pila alcanza los 65°C, los grupos de acetilo de la celulosa forman ácido acético y otros ácidos grasos volátiles (por ejemplo ácido láctico). Además, el calentamiento también lleva asociado la formación de alcoholes, agua, CO₂ y calor [8]. La formación de ácidos grasos volátiles puede llevar a problemas de lixiviados al ser arrastrados por agua de lluvia.

6.2 RECOMENDACIONES

Tras el análisis de los datos recopilados se concluye que en lo que respecta al almacenamiento de biomasa leñosa se debe tener en cuenta que el **comportamiento del material** apilado **depende de múltiples factores**, la mayoría relacionados entre sí. Estos factores principales son:

- Las **condiciones meteorológicas**, principalmente humedad relativa, lluvia o nieve, temperatura e insolación.
- El **tipo de material** apilado (astillas de frondosas o coníferas, corteza, sarmientos, etc.) influye en el contenido en humedad y la velocidad de degradación de las astillas.
- La **humedad** con la que llega la biomasa a la planta va a influir fundamentalmente en el riesgo de fermentación y en la producción de calor (favoreciendo el secado pero aumentando el riesgo de combustión espontánea). Sin embargo, una humedad excesiva disminuye el poder calorífico del combustible. Existe una humedad límite por encima de la cual la actividad microbiana se acelera, por lo que se tratará de reducir dicha humedad. Del mismo modo la humedad inicial de las astillas tiene un efecto más importante sobre la actividad microbiana que la temperatura ambiental.

- El **tamaño de las pilas** va a repercutir en el calentamiento, en la disipación de calor y el comportamiento del material. A igualdad de condiciones, las pilas grandes se calientan más. Este efecto debe aprovecharse para acelerar el secado del material.
- El **tamaño de las astillas** influye en la rapidez de la descomposición y en la combustibilidad. Las astillas más pequeñas se queman de forma más eficiente pero se degradan más deprisa durante el almacenamiento y, por tanto, causan mayores pérdidas de materia seca. El tamaño también influye en el precio de las astillas, a menor tamaño mayor precio.
- La **compactación del material** apilado determina la facilidad con la que el aire circula en el interior de la pila y por lo tanto en la disipación de calor. Al aumentar la compactación, disminuye la circulación de aire, lo que dificulta el secado y produce mayores aumentos de la temperatura.
- Recomendaciones **generales**:
 - Por eficacia en el secado, menores pérdidas de materia seca y salubridad (menor proliferación de microorganismos) es **preferible el almacenamiento en bruto, pacas o trozos grandes**. Las pacas tienen la ventaja adicional de necesitar menos espacio para su almacenamiento.
 - Si la biomasa llega a la planta empacada o en bruto, es conveniente almacenarla en ese formato y **proceder al astillado lo más tarde posible**, justo antes de que vaya a ser utilizada. Igualmente, si llega en trozos grandes, aunque el tamaño sea mayor al requerido por la caldera, interesa almacenarlos en este formato, ya que se secan bien, se genera menos calor que en pilas de astillas pequeñas, hay menos actividad microbiana, así como menos pérdidas de materia seca.
 - Si se **acumulan astillas de diferentes tamaños**, siempre que sea posible, es recomendable **utilizar** más rápidamente **las astillas de inferior tamaño**, ya que se degradan con mayor facilidad. Las astillas grandes permanecen estables durante más tiempo.
 - Procurar **no almacenar el material húmedo astillado**.
 - El astillado y la manipulación de las **astillas** deben ser optimizados para suministrar, en la medida de lo posible, astillas de **granulometría uniforme**, minimizando la cantidad de finos que dificulten la circulación de aire en las pilas.
 - Una cuidadosa **ordenación cronológica de la reposición y del consumo** del material puede minimizar las pérdidas de materia seca.
- Recomendaciones relativas a **instalaciones** para ubicar y/o proteger las pilas:
 - Apilar directamente en el suelo y a la intemperie, es el método de almacenamiento más económico.
 - Cuando el material está en planta, es necesario nivelar el terreno y cubrirlo con cemento u otro material que evite el aporte de suciedad y permita un acceso limpio al combustible independientemente de las condiciones meteorológicas. La superficie debe tener una pequeña inclinación para evitar la acumulación de agua y facilitar el drenaje.
 - El almacenamiento de astillas en silos se utiliza generalmente para inventarios pequeños, de un día a un máximo de una semana de producción. Durante periodos más largos acarrea problemas en la manipulación y seguridad (falta de ventilación) del combustible. Las cámaras de almacenamiento o los edificios deben ser construidos de materiales que en la medida de lo posible sean resistentes a la colonización de microbios y su ataque, tratando las estructuras de madera y hormigón tratado con conservantes o anti-fúngicos.

- Para cubrir el material apilado se pueden emplear lonas, aunque esta opción no es muy recomendable por las dificultades en la manipulación, sobre todo en planta. En el caso de que se empleen, para biomasa con un contenido en humedad bajo, entre 20-25%, son adecuados materiales impermeables como las láminas de polietileno. Sin embargo, para biomásas más húmedas se necesitan materiales transpirables, por lo que podría ser más adecuado un tejido de polipropileno. Las cubiertas impiden la correcta circulación del aire en algunos casos produciendo un menor secado y disipación de calor.
- La protección del material frente a la lluvia reporta otros beneficios como evitar la emisión de partículas al ambiente debida a la manipulación del material. La cobertura genera una temperatura ligeramente superior, lo que favorece la velocidad de secado. El almacenamiento en general provoca una disminución de la calidad del material (aumento de cenizas y finos, y disminución de volátiles, carbono fijo y poder calorífico), lo que es notable en el caso de material astillado.
- Es recomendable realizar las pilas lo más altas posibles ya que con esto se consigue un mejor secado al aumentar la zona central de la pila, menos afectada por las condiciones externas. Si bien, para reducir los riesgos de autocombustión, en países cálidos, la altura recomendada de la pila debería ser de 6 m.
- Se debe hacer un seguimiento sistemático de las temperaturas generadas en el interior (sobre todo si estas contienen cortezas y/o elementos finos o están cubiertas con costras de nieve) y remover, regar y/o descabezar los montones cuando se alcancen temperaturas mayores a 60 °C. El calentamiento de las pilas se puede aprovechar para que el combustible se seque de forma natural, pero teniendo en cuenta el peligro de autocombustión y pérdidas de materia seca, del mismo modo acelera la descomposición por actividad microbiana en los primeros meses de almacenamiento. No tener nunca fuentes de alta temperatura o ignición cercanas a la pila, por ejemplo se debe controlar los puntos calientes de la maquinaria operativa.
- Al voltear las pilas hay que evitar el aporte de piedras y tierra durante la manipulación, incluso a costa de perder una capa de astillas que se deja en el terreno para evitar el contacto de la maquinaria (palas, pinzas, etc.) con la tierra del suelo. Eliminar los objetos metálicos en las pilas, ya que pueden favorecer reacciones químicas exotérmicas que conlleven al encendido de la pila.
- Si se dispone de suficiente espacio de almacén, y en condiciones climáticas adecuadas, es beneficioso extender el material para secarlo siempre y cuando el área del almacenamiento se encuentre limpia.

REFERENCIAS

- [1] Proyecto *LIGNOCROP*: "INVESTIGACIÓN EN CULTIVOS PARA COMBUSTIÓN": Ministerio de Ciencia e Innovación, PlanE I+D Ref. CC09-063, encomienda de gestión AEG09-059 Entidades participantes: UCLM, INIA, IVIA, IBERDROLA RENOVABLES
- [2] Anon. (1998): "Storage of wood chips" Office of the Fire marshal of Ontario pp5. Referenciado en Garstang, J., et al. (2002): "Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices." DTI's New and Renewable Energy Programme.
- [3] Jirjis, R. (2005): "Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*." Biomass and Bioenergy vol. 28, pp 193-201.
- [4] Fuller, W.S. (1985): "Chip pile storage –a review of practices to avoid deterioration and economic losses" Tappi Journal, 68. Referenciado en Garstang, J., et al. (2002): "Identification and characterisation of factors affecting

- losses in the large-scale, non ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices." DTI's New and Renewable Energy Programme.
- [5] Idler, Ch., et al. (2005): "*Loos reduced storage of short rotation coppice.*" Agricultural Engineering, Research papers 37, vol 1, pp. 124-134.
- [6] Thörnqvist, T. (1984): "*Hyggesrester som råavaror för energiproduktion – Torking, lagring, hantering och kvalitet (Logging residues as a feedstock for energy production – Drying, storing, handling and grading)*". SLU, Inst. för virkeslära, Rapport No. 152, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): "*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*" Biomass and Bioenergy vol. 28 pp 444-453.
- [7] Garstang, J., et al. (2002): "*Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices.*" DTI's New and Renewable Energy Programme.
- [8] Ortiz, L. (2005): "*Tecnologías de producción de los biocombustibles sólidos*", I Jornada sobre Biocombustibles Sólidos para Usos Térmicos y Co-combustión. Madrid.
- [9] Ortiz, L. (1996): "*Aprovechamiento energético de la biomasa forestal*". Ed. Gamesal.
- [10] Baldini, S. (1986): "*Forest biomass for energy in ECC countries from harvesting to storage*" Instituto per la ricerca sul legno consiglio nazionale delle ricerche. Florence. Incluido en: Ferrero G.L., Grassi G., Williams H.E. (1987): "*Biomass energy: From harvesting to storage*". Editorial Elsevier, London
- [11] España, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2004): "*Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales*", BOE n° 303, de 17 de diciembre de 2004.
- [12] Pari L., Ciriello A., Galluci F. (2008): "*Consequence of SRF poplar wood harvesting method on energy content preservation*", Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, Spain, pp 571-522.
- [13] Gigler, J.K. et al. (2000): "*Natural wind drying of willow stems*", Biomass and Bioenergy, vol. 19, pp 153-163.
- [14] Estudio FAO (1978): "*Las astillas de Madera: su producción, manipulación y transporte*". Roma.
- [15] Thörnqvist, T. (1983): "*Lagring av sönderdelade hyggesrester (Storing of disintegrated logging residuals)*" Severiges lantbrunskuniversitet, Inst. för virkeslära, Rapport No. 137, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): "*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*" Biomass and Bioenergy vol. 28 pp 444-453.
- [16] Thörnqvist, T. (1983): "*Bränsleflisens förändring under ett års lagring*". Severiges lantbrunskuniversitet, Inst. för virkeslära, Rapport No. 148, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): "*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*" Biomass and Bioenergy vol. 28 pp 444-453.
- [17] Thörnqvist, T. (1990): "*Projekt storskalig säsonglagring av trädbränsle – en sammanfattning av etapp 1 (Large-scale seasonal storage of tree fuel project-summary of phase 1)*". SLU, Inst. för virkeslära, Rapport No. 188, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): "*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*" Biomass and Bioenergy vol. 28, pp 444-453.
- [18] Jirjis R., Lehtikangas P., Oskarsson R. (1993): "*Terminallagring av bränsleflis*". Projekt skogskraft, Rapport No. 16/93. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): "*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*" Biomass and Bioenergy vol. 28, pp 444-453.

- [19] Gilserud, O. (1990): "Drying and storing of comminuted wood fuels." *Biomass*, vol. 22, pp 229-244.
- [20] Jirjis, R. (1995): "Storage and drying of wood fuel." *Biomass and Bioenergy*, vol. 9, pp 181-190.
- [21] W. Hogland, M. Marques (2003) "Physical, biological and chemical processes during storage and spontaneous combustion of waste fuel Resources", *Conservation and Recycling*, Volume 40, Issue 1, Pages 53-69.
- [22] Rupar-Gadd K. (2006) "Biomass Pre-treatment for the Production of Sustainable Energy – Emissions and Self-ignition" Acta Wexionensia No 88/2006 Bioenergy Technology Thesis for the degree of Doctor of Technology, Växjö University, Sweden. Series editors: Tommy Book and Kerstin Brodén ISSN: 1404-4307 ISBN: 91-7636-501-8 Printed by: Intellecta Docusys, Göteborg.
- [23] Chou, Francis E. Jenney Jr., Michael WW. Adams, Robert M. Kelly (2008) "Hydrogenesis in hyperthermophilic microorganisms: Implications for biofuels" *Metabolic Engineering*, Volume 10, Issue 6, November Pages 394-404.
- [24] Clausen C. A. (1996) "Bacterial associations with decaying wood: a review" *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 37, Issues 1-2, Pages 101-107.
- [25] Rogers G.; Jackson S.; Shelver G.; Baecker A. (1992) "Anaerobic degradation of lignocellulosic substrates by a 1,4 beta – xylanolytic *Clostridium species novum*" *International Biodeterioration & biodegradation* 29 3-17.
- [26] Baeta-Hall L., Sàágua M. C., Bartolomeu M., Anselmo A. M. Rosa M. F. (2005) "Bio-degradation of olive oil husks in composting aerated piles" *Bioresource Technology* 96 pág. 69–78.
- [27] Lothner, D.P. Bradley and R.L. Gambles (1988) "Economic evaluations of short rotation biomass energy systems". Proc. IEA/BA Task II workshop, 1-3 August 1987, Duluth, USA. IEA/BA Information Report 88:2. ~23-39. Citado en Mitchell C. P. (1995) "New cultural treatments and yield optimization" *Biomass and Bioenergy* vol. 9 1-5: 11 – 34.
- [28] Bullard M.; Heaton R. Nixon P. (2004) "Winkleigh biomass electricity generator" Environmental statement Volume 3 Biomass Fuel Assessment Bio- Renewables LTD
- [29] Deutmeyer, M. (2007): "Strategies for supply of raw material in the energy industry". Biomass to liquids, Choren.
- [30] Miller, J. D., Laflamme, A. M., Sobel, Y., Lafontaine, P. & Greenhalgh, R. (1988). "Fungi and fungal products in some Canadian houses. *Int. Biodeterioration*", 24, 103-20.
- [31] Monn, C. (2001) "Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone". *Atmospheric environment* 35, s 1-32 citado en Rupar-Gadd K. (2006) "Biomass Pre-treatment for the Production of Sustainable Energy – Emissions and Self-ignition" Acta Wexionensia No 88/2006 Bioenergy Technology Thesis for the degree of Doctor of Technology, Växjö University, Sweden 2006 Series editors: Tommy Book and Kerstin Brodén ISSN: 1404-4307 ISBN: 91-7636-501-8 Printed by: Intellecta Docusys, Göteborg 2006.
- [32] Nordic Innovation Centre "Guidelines for storing and handling of solid biofuels nordtest" method 1 (18) ISSN: 1459–2800 Project: 06180 NT ENVIR 010 www.nordicinnovation.net
- [33] Katarina Rupar, Mehri Sanati (2003) "The release of organic compounds during biomass drying depends upon the feedstock and/or altering drying heating medium" *Biomass and Bioenergy* 25 615 – 622.

- [34] Katarina Rupar-Gadd, Mohammad Bagher Bagherpour, Göran Holmstedt, Ulrika Welander, Mehri Sanati. (2006) "*Solid phase micro extraction fibers, calibration for use in biofilter applications*" Biochemical Engineering Journal 31 107–112.
- [35] Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) "*The release of terpenes during storage of biomass*" Biomass and Bioenergy 28 29–34
- [36] Nammari, Di. , Hogland, W., Marques, M., Nimmermark, S., Moutavtchi, V., (2004). "*Emission from uncontrolled fire in municipal solid waste bales*". Waste Management 24, 9–18. Citado en Moqbel S., Reinhart D., Chen R. H. (2010) "*Factors influencing spontaneous combustion of solid waste Waste Management*" 30 1600–1607.
- [37] Kasanen J-K, Pasanen A-L, Pasanen P. (1999) "*Evaluation of sensory irritation of D3-carene and Turpentine, and acceptable levels of monoterpenes in occupational and indoor environment*". Journal of Toxicology and Environmental Health Part A 56:89–114. citado en Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) "*The release of terpenes during storage of biomass*" Biomass and Bioenergy 28 29–34.
- [38] Demers PA, Teschke K, Kennedy SM. (1997) "*What to do about softwood? A review of respiratory effects and recommendations regarding exposure limits*". American Journal of Industrial Medicine 31: 385–98. Citado en Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) "*The release of terpenes during storage of biomass*" Biomass and Bioenergy 28 29–34.
- [39] Falk-Filipsson A. (1995) "*Toxokinetic and acute effects of inhalation exposure to monoterpenes in man*". Arbetssmiljö institutet, Arbete och Hälsa 3. ISBN: 91-7045-294-6. Citado en Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) "*The release of terpenes during storage of biomass*" Biomass and Bioenergy 28 29–34.
- [40] Camps, M. y Marcos, F. (2001): "*Los biocombustibles*". Colección energías renovables. Ed. Mundi Prens.
- [41] Buatas, E. (1983) "*Utilització de residus de fusta com a combustible industrial*". Generalitat de Catalunya. Departament d'Indústria i Energia.
- [42] Springer, E.L. (1980), "*Should whole-tree chips for fuel be dried before storage?*" United States Department of Agriculture. Forest Service.



■ Creación
de Riqueza
y Contribución
socio-
medioambiental

7. CREACIÓN DE RIQUEZA Y CONTRIBUCIÓN SOCIO-MEDIOAMBIENTAL

Se quiere analizar la creación de riqueza y las contribuciones sociales y ambientales que la construcción y explotación de una planta de biomasa genera en su entorno.

El interés principal para el desarrollo de este análisis radica en la poca atención que se le ha otorgado a este campo de estudio a la hora de analizar las consecuencias de utilización de la biomasa como fuente de energía.

La metodología desarrollada ha sido la siguiente

- Por un lado, se ha trabajado en el diseño y modelización de una herramienta de cálculo de Creación de Riqueza y Empleo aplicable a distintas tipologías de plantas de biomasa. Esta herramienta tiene como objetivo poder obtener la riqueza económica, los retornos fiscales y el empleo mantenido por una determinada planta, cuyas características dependen, fundamentalmente, de la potencia instalada en la misma (10, 15, 20, 25 ó 50 MWh) y de la tipología de combustible que utiliza.
- Por otra parte, se ha avanzado paralelamente en construir un sistema de indicadores que, de forma complementaria al análisis de Creación de Riqueza y Empleo, evalúe la contribución social y medioambiental del proyecto analizado. Este sistema, o cuadro de mando de indicadores, se ha añadido a la herramienta expuesta en el anterior punto, con el objetivo de aportar un enfoque socio-medioambiental al análisis.

7.1 ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA DESARROLLADA

7.1.1 Cálculo de Creación de Riqueza, Mantenimiento de Empleo y Retornos para la Hacienda Pública

Este cálculo tiene como objetivo poder obtener la riqueza económica, los retornos fiscales y el empleo mantenido por el proyecto de planta de biomasa que se esté analizando.

El trabajo desarrollado se basa en un modelo de la Universidad de Deusto cuya base son las tablas input-output concebidas por Wassily Leontief¹ y que permite determinar la riqueza generada de forma anual por un proyecto o inversión.

Una vez modelizada la herramienta, se ha estructurado en un soporte Excel para que pueda ser utilizada cargando la inversión y costes asociados al proyecto sujeto a análisis. Al introducir estas variables se obtienen los resultados en los siguientes campos: PIB generado, empleo mantenido y retornos fiscales (en concepto de Impuestos de Sociedades, IRPF e IVA)

7.1.2 Análisis de la Aportación Social y Medioambiental

La Aportación Social y Medioambiental que genera el proyecto se plasma a través de un sistema de indicadores o cuadro de mando. Estos indicadores se cuantifican de diversas formas y están ligados a la dimensión energética, rural y sostenible del proyecto de planta de biomasa analizado.

El análisis de Aportación Social y Medioambiental permite la identificación y valoración de las contribuciones del proyecto al entorno en términos no puramente económicos.

¹ Wassily Wassilyovich Leontief (San Petersburgo, 1906 - Nueva York, 1999) Economista estadounidense que destacó por sus estudios teóricos y desarrolló la metodología *input-output* de análisis económico, por la que se le concedió el premio Nobel de Economía en 1973.

Una vez analizados y confeccionado el sistema de Indicadores Socio-medioambientales, se han volcado en un apartado específico de la herramienta Excel creada para el cálculo de Creación de Riqueza y Empleo (punto anterior)

7.2 METODOLOGÍA APLICADA

El modelo desarrollado por la Universidad de Deusto plantea una metodología diferenciada para las dos partes que componen la herramienta desarrollada.

7.2.1 Metodología para el Cálculo de Creación de Riqueza, Mantenimiento de Empleo y Retornos para la Hacienda Pública

El trabajo correspondiente a este apartado se basa en cuatro fases que se exponen a continuación:

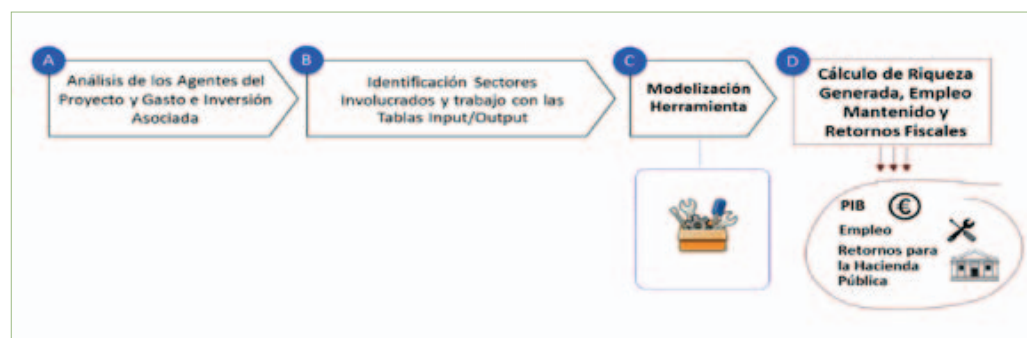


Figura 71. Proceso de Trabajo para Cálculo de Creación de Riqueza, Mantenimiento de Empleo y Retornos para la Hacienda Pública

A. Análisis de los Agentes del Proyecto y Gasto e Inversión Asociada

El análisis empieza con una identificación de los distintos agentes que están involucrados en la puesta en marcha y explotación de una planta de biomasa.

Se considera agente a toda persona física o jurídica que realiza un gasto o inversión asociada a la puesta en marcha del proyecto. El sumatorio de los gastos e inversiones llevadas a cabo por el conjunto de agentes identificados dará como resultado el gasto e inversión directa total (o demanda total).

Para llevar a cabo esta primera etapa del análisis es necesario comprender el ciclo de vida de una planta de biomasa, las distintas fases de construcción, explotación y desmantelamiento que componen este ciclo y las interrelaciones económicas que se producen en las mismas (resultados que se exponen en el Apartado 7.3 del presente informe).

B. Identificación Sectores Involucrados y Cálculo de los Multiplicadores Input/Output

Una vez comprendido el ciclo de vida de una planta de biomasa, identificados los agentes que intervienen a lo largo de este ciclo y los gastos e inversiones que se desencadenan para desarrollar el proyecto, se identifican los sectores económicos a los que se dirigen estos gastos e inversiones (estos sectores económicos se exponen en el Apartado 7.3 del Informe).

Para ello se ha trabajado sobre la base de las últimas Tablas Input – Output de la economía española publicadas por el INE y correspondientes al año 2009² (últimas tablas disponibles). Las Tablas Input – Output son una fotografía general de la circulación de bienes y servicios en una economía nacional. La piedra angular del modelo es la matriz de relaciones intersectorial que refleja cuanto se venden y compran todos los sectores entre ellos. En otras palabras,

2 INE. Contabilidad Nacional de España. Base 2008. Serie 2000-2012. Tablas de Origen y Destino. Año 2009.

se trata de un instrumento de medida de la actividad económica en la que se representan las operaciones de producción y distribución acontecidas en una economía a lo largo del año³.

Una vez conocido la demanda total que genera el ciclo de vida de una planta de biomasa en sus distintas fases (promoción, construcción, explotación y desmantelamiento) y los distintos sectores económicos afectados según la tipología de gasto e inversión desplegada por los distintos agentes, se calculan los multiplicadores asociados a cada uno de los sectores económicos identificados.

Un multiplicador es un coeficiente que permite obtener el impacto total en un determinado agregado (PIB, Empleo, Retornos Fiscales), causado por una demanda final dirigida a un determinado sector económico. Este efecto es lo que se conoce como efecto multiplicador del gasto, y mide el aumento del PIB que resulta del aumento de una unidad monetaria de gasto⁴.

C. Modelización de la Herramienta

Una vez comprendido el ciclo de vida de una planta de biomasa, identificados los agentes que intervienen, comprendido los gastos e inversiones que realizan este ciclo y obtenidos los multiplicadores correspondientes a los sectores económicos afectados por este proceso, se ha modelado una herramienta en formato Excel para poder obtener resultados en base a distintas tipologías de plantas de biomasa según la potencia instalada en la mismas (10, 15, 20, 25 ó 50 MWh) y la tipología de combustible.

D. Cálculo de Riqueza, Mantenimiento de Empleo y Retornos Fiscales Generados

Por último, una vez preparada la herramienta en base Excel, se puede empezar a cargar con la información necesaria para analizar la generación de PIB, los puestos de trabajo mantenidos y los retornos fiscales generados por el proyecto utilizado (la estructura de herramienta desarrollada y ejemplos de resultados obtenidos se muestran en el Apartado 7.4 del Informe)

7.2.2 Metodología para el Análisis de la Aportación Social y Medioambiental

De forma paralela al trabajo de creación y modelización de la herramienta expuesto en el punto anterior, durante el proyecto se ha trabajado también en una serie de indicadores incorporados a la herramienta y que sirven para medir la aportación socio-medioambiental de una planta de biomasa.



Figura 72. Proceso de Trabajo para la elaboración del Análisis de la Aportación Social y Medioambiental

3 EUSTAT (2000): Nota metodológica, Tablas Input-output de la C.A. de Euskadi

4 SAMUELSON, P y NORDHAUS W (2010): Economía, McGrawHill, Madrid.

En este sentido, la consideración de la influencia del proyecto en su entorno puede analizarse mediante:

- La identificación de las principales variables sociales y medioambientales a las que contribuye
- La concreción de la forma que aporta valor a cada variable
- La cuantificación de la contribución a cada variable, tanto cualitativamente como en términos cuantitativos y económicos.

Todo ello conlleva al diseño y construcción de un cuadro de mando de indicadores que mide la aportación Social y Medioambiental de una planta de biomasa. Esta medición está ligada a la dimensión energética, rural y sostenible del proyecto en cuestión y permite la identificación y valoración de las contribuciones del proyecto al entorno en términos no puramente económicos.

Una vez diseñado este panel de indicadores socio – medioambiental se incorpora como una pieza fundamental de la herramienta desarrollada para determinar la creación de riqueza, mantenimiento de empleo y generación de retornos fiscales, con el objetivo de que el modelo desarrollado también calcule la aportación y medioambiental del proyecto.

7.2.3 Hipótesis de trabajo y limitaciones de la metodología utilizada

La metodología utilizada y las fases de trabajo plasmadas en el presente apartado presentan una serie de hipótesis y limitaciones que se enumeran a continuación:

- El modelo de cálculo de Creación de Riqueza y Empleo desarrollado no cuantifica el coste de oportunidad consecuencia de que la inversión prevista para el proyecto de planta de biomasa sujeto a estudio se destinara a otra actividad.
- En cuanto a los multiplicadores sectoriales calculados, se ha utilizado los multiplicadores asociados a las actividades y distintas partidas presupuestarias que se desarrollan en la promoción, construcción, explotación y puesta en marcha de una planta de biomasa.
- Para el cálculo del impacto se ha utilizado como base el Marco input-output de la Contabilidad Nacional de España (Tablas de Origen y Destino 2009. Últimas tablas publicadas por el INE el 21 de junio de 2013).
- La herramienta de Creación de Riqueza y Empleo en formato Excel posibilitará la obtención de resultados dependiendo de las magnitudes de inversión que se introduzcan, pero tiene unas limitaciones temporales y operativas debido a las tablas input-output utilizadas y a las lógicas restricciones que conlleva la parametrización de una herramienta de cálculo de este tipo en formato Excel.
- Las fuentes de información utilizadas han sido los estudios y documentación sobre proyectos de planta de biomasa aportados por Iberdrola, las tablas Input-Output e información macroeconómica asociada publicadas por el INE y otros organismos oficiales, así como información interna y metodológica de la Universidad de Deusto.

7.3 MAPEADO DE LA INVERSIÓN EN UNA PLANTA DE BIOMASA: AGENTES, FASES Y ACTIVIDADES

7.3.1 Ciclo de vida de una Planta de Biomasa

El mapeado y análisis de los gastos e inversiones que conlleva una planta de biomasa es vital a la hora de las distintas fases, actividades y agentes involucrados en el proyecto. Por ello, como primer paso, se debe analizar el ciclo de vida

de una planta de biomasa con el objetivo de conocer el circuito completo que conlleva la puesta en marcha de este tipo de infraestructura energética.

Este análisis del ciclo de vida de una planta de biomasa se realizó de forma conjunta con Iberdrola y conlleva un periodo medio de 28 años, divididos en las siguientes dos grandes áreas, a saber:

Planta de Biomasa

Se refiere a todas las actividades en torno a la planta en sí durante los 28 años de vida de la misma y, a su vez, se ha dividido en cuatro periodos:

- Promoción (1 año)
- Construcción (2 años)
- Explotación (24 años)
- Desmantelamiento Planta (1 año)

Combustible

Una planta de biomasa puede utilizar una amplia variedad de combustible⁵, tal y como se muestra a continuación:

Cultivos energéticos
Residuos agrícolas y de jardinería
Residuos forestales
Residuos industrias agrícolas
Residuos industrias forestales
Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)
Biomasa Importada

Aunque cada uno de estos combustibles presentan una serie de características energéticas, económicas y logísticas, existe una diferencia relevante para el el modelo de Creación de Riqueza y Empleo entre el combustible obtenido por “Cultivo Energético” y el resto de combustibles.

Esta diferencia radica en el hecho de que el cultivo energético asociado a una planta de biomasa conlleva una serie de actividades y trabajos que no están presentes en el resto de tipologías de combustibles y que, en sí mismos, presentan un ciclo de vida íntimamente imbricado con el ciclo de vida de una planta de biomasa.

Por ello, además del ciclo de vida de una planta de biomasa se ha trabajado para obtener el ciclo de vida asociado al “Cultivo Energético”, que se muestra a continuación y que también es de 28 años contemplando distintos ciclos según la fase en cuestión:

- Plantación (3 años, 2 ciclos)
- Corta (2 ciclos de 12 años)

⁵ En palabras del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo) “La biomasa para energía se obtiene mayoritariamente de las industrias de primera y segunda transformación de los productos agrícolas y forestales, de los residuos de explotaciones ganaderas, de los restos de aprovechamientos forestales, de los residuos de los cultivos y también de cultivos implantados y explotados con el único objetivo de la obtención de biomasa. A estos últimos se les denomina cultivos energéticos, pero no dejan de ser cultivos forestales o agrícolas. La ventaja fundamental de los cultivos es la predictibilidad de su disposición y la concentración espacial de la biomasa, asegurando el suministro. La predictibilidad de la disposición de la materia prima es fundamental para cualquier industria, y la de la energía no es distinta. La concentración del recurso permite una gestión mecanizada, poco intensiva en mano de obra, y relativamente barata” (Fuente: IDAE “Biomasa, Cultivos Energéticos”, 2007, Madrid)

- Trabajos Culturales (2 ciclos de 13 años)
- Desmantelamiento Plantación (1 año)

Los ciclos de vida asociados a una Planta de Biomasa y al Cultivo Energético están íntimamente ligados. Este hecho se puede observar en la Tabla 44, que se muestra a continuación y en la que se han reflejado las distintas fases que conlleva tanto el desarrollo de un Cultivo Energético como la construcción y explotación de una Planta de Biomasa.

Aquellas casillas marcadas muestran el momento, dentro de los 28 años de vida útil que presenta una Planta de Biomasa, en el que se dan las actividades ligadas a cada fase expuesta (Ej. La plantación del Cultivo Energético se materializa en los años 1, 2, 3 y en los años 13, 14 y 15).

Año	Cultivo Energético				Planta de BioMasa			
	Plantación (3 años, 2 ciclos)	Corta (2 ciclos de 12 años)	Trabajos Culturales (2 ciclos de 13 años)	Desmantelamiento Plantación (1 año)	Promoción (1 año)	Construcción (2 años)	Explotación (Anual)	Desmantelamiento Planta (1 año)
1	✓		✓		✓			
2	✓		✓			✓		
3	✓	✓	✓			✓		
4		✓	✓				✓	
5		✓	✓				✓	
6		✓	✓				✓	
7		✓	✓				✓	
8		✓	✓				✓	
9		✓	✓				✓	
10		✓	✓				✓	
11		✓	✓				✓	
12		✓	✓	✓			✓	
13	✓	✓	✓	✓			✓	
14	✓	✓	✓	✓			✓	
15	✓	✓	✓				✓	
16		✓	✓				✓	
17		✓	✓				✓	
18		✓	✓				✓	
19		✓	✓				✓	
20		✓	✓				✓	
21		✓	✓				✓	
22		✓	✓				✓	
23		✓	✓				✓	
24		✓	✓	✓			✓	
25		✓	✓	✓			✓	
26		✓	✓	✓			✓	
27							✓	
28								✓

Tabla 44. Ciclo de Vida de una Planta de Biomasa y del Cultivo Energético asociado a la misma

7.3.2 Agentes, fases y actividades involucradas

Una vez comprendido el ciclo de vida de una planta de biomasa, y de su posible cultivo energético asociado, se analizan los agentes, fases y actividades implicadas en los distintos momentos de este ciclo de vida.

7.3.2.1 Ciclo de Vida de la Planta de Biomasa

A continuación se muestra las cuatro grandes fases, así como sus gastos e inversiones asociadas, en la que se ha dividido la actividad de una central de biomasa durante todo su periodo de vida útil.

En cada una de estas fases estarán involucrados distintos agentes que acometerán, de forma coordinada y enlazada en el tiempo, distintos gastos e inversiones. El conocimiento, análisis y mapeado de estas actividades es un paso previo fundamental para el cálculo de creación de riqueza y empleo

En las siguientes páginas se detallan las fases expuestas mostrando los agentes implicados, plazos estimados de realización y los gastos e inversiones asociadas a cada una de estas etapas.

FASES Y SUBFASES	AGENTES Y PLAZO	TIPOLOGÍA DE GASTOS / INVERSIÓN
1. Promoción		
1.1 Promoción	Iberdrola Iberdrola Ingeniería [Plazo: 1 año]	Gastos de Aprendizaje y Promoción Tramitación Interna [Logística Aprovisionamiento Plan de Negocio Anteproyecto de Ingeniería Básica Tramitación Admva. [Licencias Permisos Tasas
2. Construcción		
2.1 Construcción	Iberdrola Iberdrola Ingeniería [Plazo: 2 años]	Gasto Caldera, Sistema de Alimentación de Biomasa Gasto Turbina de Vapor y Sistemas Auxiliares Gasto Sistema Refrigeración Gasto Sistema eléctrico, instrumentación y Control Obra Civil Gasto Ingeniería y Supervisión Otros Gastos Gastos Personal
3. Explotación [Plazo Total Explotación: 24 años]		
3.1 Operación e Inversión	Iberdrola	Gasto Personal Gastos Financieros
3.2 Mantenimiento	Tercero Subcontratado	Gastos de Subcontratación Gastos de Material
3.3 Combustible <ul style="list-style-type: none">• Cultivo o Residuo• Transporte• Almacén	Iberdrola y Terceros	Sumatorio de Gastos* (*el detalle del ciclo de vida del Cultivo Energético tiene sus propia tabla)
4. Cierre planta	Iberdrola Ing. y Terceros [Plazo: 1 año]	Costes de Desmantelamiento

Tabla 45. Agentes, fases y actividades involucradas en el Ciclo de Vida de una Planta de Biomasa

7.3.2.2 Ciclo de Vida del Cultivo Energético

Tal y como se ha comentado en el Apartado 7.1 del presente Informe, existe una tipología de combustible, el Cultivo Energético, que presenta un ciclo de vida íntimamente ligada a la puesta en marcha, explotación y desmantelamiento de una planta de biomasa.

A continuación se muestra un esquema de los principales agentes, fases y actividades involucradas en este tipo de combustible.

FASES Y SUBFASES	AGENTES Y PLAZO	TIPOLOGÍA DE GASTOS / INVERSIÓN
1. Plantación		
1.1 Plantación	Suministrador <i>[Plazo: 3 años, 2 ciclos]</i>	Gastos de Prospección Gastos de Plantación
2. Corta, transporte y venta		
2.1 Corta, transporte y venta	Suministrador <i>[Plazo: 2 ciclos de 12 años]</i> <i>Nota: La Subfase de Almacenaje puede desempeñarla Iberdrola o subcontratarla</i>	Gastos de Alquiler Gastos de Recolección y Transporte Gastos de Almacenado y Secado Gastos de Otros Margen Comercial
3. Trabajos Culturales		
3.1 Trabajos Culturales	Suministrador <i>[Plazo: 2 ciclos de 13 años]</i>	Gastos en Trabajos Culturales
4. Desmantelamiento de la Plantación		
4.1 Desmantelamiento de la Plantación	Suministrador <i>[Plazo: 3 años, 2 ciclos]</i>	Gastos de Desmantelamiento

Tabla 46. Agentes, fases y actividades involucradas en el Ciclo de Vida del Cultivo Energético

7.3.2.3 Sectores económicos asociados

Una vez mapeados los agentes, fases, actividades y gastos e inversiones involucrados en un proyecto de planta de biomasa durante todo su ciclo de vida, se pasa a identificar los distintos sectores económicos hacia los que estos agentes dirigen los gastos e inversiones que realizan.

A continuación se muestra una tabla con este emparejamiento entre actividades de gasto e inversión y sectores económicos⁶. En relación con la tabla expuesta se ha de remarcar que, al contrario que en los apartados anteriores y con el objetivo de realizar un análisis unificado, se han incluido todos los gastos e inversiones asociadas a los distintos combustibles que puede utilizar una planta de biomasa (incluido el cultivo energético) en la Fase 3 de Explotación.

⁶ Para la selección de sectores económicos se ha tomado como referencia las ramas de actividad presentes en las Tablas Input – Output de la economía española 2009.

Fase	Subfase	Tipología de Gasto e Inversión	Sectores Económicos Asociados	
1. Promoción	1.1 Promoción	Gastos de Aprendizaje y Promoción	Investigación y desarrollo	
		Pre-Ingeniería de Desarrollo	Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería, ensayos y análisis técnicos	
		Tramitación Interna	Administración pública y defensa; seguridad social obligatoria	
		Tramitación Admva.		
2. Construcción	1.2 Construcción	Gasto Caldera, Sistema de Alimentación de Biomasa	Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones	
		Gasto Turbina de Vapor y Sistemas Auxiliares	Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones	
		Gasto Sistema Refrigeración	Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones	
		Gasto Sistema eléctrico, instrumentación y Control	Fabricación de material y equipo eléctrico	
		Gasto de Sistema y Equipamiento de Almacén	Almacenamiento y actividades anexas al transporte	
		Gasto de Obra Civil de la Planta	Construcción	
		Gasto de Obra Civil del Almacén	Construcción	
		Gasto Ingeniería y Supervisión	Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería, ensayos y análisis técnicos	
		Gasto de Línea de Evacuación & Punto de Conexión	Suministro de energía eléctrica, gas, vapor y aire acondicionado	
		Otros Gastos	Otros	
		Gastos Personal	Varios Sectores	
		3. Explotación	4.1 Operación e Inversión	Gastos Personal
Gastos Financiero	Servicios financieros, excepto seguros y fondos de pensiones			
4.2 Mantenimiento	Gastos de Subcontratación		Reparación e instalación de maquinaria y equipo	
	Gastos de Material (segmentación por %)		Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones // Fabricación de material y equipo eléctrico	
4.3 Combustible				
4.3.1 Combustible o Residuo				
4.3.1.1 Cultivo Energético	Gastos de Prospección		Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería, ensayos y análisis técnicos	
	Gastos de Plantación		Selvicultura y explotación forestal	
	Gastos de Trabajos Culturales		Selvicultura y explotación forestal	
	Gastos de Recolección y Transporte		Almacenamiento y actividades anexas al transporte// Transporte de mercancías por carretera y servicios de mudanza; transporte por tubería	
	Gastos de Almacenado y Secado		Almacenamiento y actividades anexas al transporte	
	Gastos de Otros		Otros	
	Margen Comercial		Otros	
	Desmantelamiento de la Plantación		Selvicultura y explotación forestal	
4.3.1.2 Residuos Forestales	Gasto de Corta y Extracción		Selvicultura y explotación forestal	
	Gasto de Almacenaje y Tratamiento		Almacenamiento y actividades anexas al transporte	
	Margen Comercial	Otros		
4.3.1.3 Residuos Agrícolas	Gasto de Corta y Extracción	Agricultura, ganadería, caza y servicios relacionados con las mismas		
	Gasto de Almacenaje y Tratamiento	Almacenamiento y actividades anexas al transporte		
	Margen Comercial	Otros		

Fase	Subfase	Tipología de Gasto e Inversión	Sectores Económicos Asociados
3. Explotación continuación	4.3.1.4 F.O.R.S.U	Gasto de Compra	Actividades de saneamiento, gestión de residuos y descontaminación
		Margen Comercial	Otros
	4.3.1.5 Importación Biomasa	Gasto de Compra	Transporte de mercancías por carretera y servicios de mudanza; transporte por tubería
		Margen Comercial	Almacenamiento y actividades anexas al transporte
	4.3.1.6 Madera Recuperada	Gasto de Almacenaje y Acondicionamiento	Almacenamiento y actividades anexas al transporte
		Margen Comercial	Otros
	4.3.1.7 Industrias Forestales	Gasto de Almacenaje y Acondicionamiento	Almacenamiento y actividades anexas al transporte
		Margen Comercial	Otros
	4.3.1.8 Industrias agrícolas	Gasto de Almacenaje y Acondicionamiento	Almacenamiento y actividades anexas al transporte
		Margen Comercial	Otros
4.3.2 Transporte	Gasto de Transporte	Transporte de mercancías por carretera y servicios de mudanza; transporte por tubería	
4.3.3 Almacén	Gasto de Almacenaje	Almacenamiento y actividades anexas al transporte	
	Gastos Acondicionamiento	Industria de la madera y del corcho	
4. Cierre de planta	4.1 Cierre de planta	Gasto de Cierre y Desmantelamientos (segmentación por %)	Construcción // Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería, ensayos y análisis técnicos

Tabla 47. Sectores económicos asociados los gastos e inversiones de una planta de biomasa

7.4 HERRAMIENTA DESARROLLADA Y RESULTADOS OBTENIDOS

7.4.1 Herramienta desarrollada

Tras el mapeado de los gastos e inversiones asociadas a una planta de biomasa se han obtenido los distintos agentes, fases y actividades involucradas a lo largo de su ciclo de vida de 28 años. Asimismo, se han identificado los principales sectores afectados por la puesta en marcha, explotación y desmantelamiento de esta infraestructura energética, así como del combustible asociado a la misma.

Esta información combinada con los multiplicadores resultantes de las Tablas Input – Output de la economía española para el año 2009 publicadas por el INE (último año disponible), nos permite la elaboración de la herramienta de cálculo de Creación de Riqueza y Empleo en formato Excel.

Tal y como se ha expuesto en el Apartado 7.1 del presente Informe, esta herramienta cuantifica la generación de PIB y la cantidad de empleo mantenido, que a su vez generan retornos a la Hacienda Pública, e incorpora un panel de indicadores socio-medioambientales que permiten la valoración de las contribuciones del proyecto al entorno en términos no puramente económicos.

Cabe destacar que la herramienta desarrollada se ha enlazado con la herramienta de gestión y *controlling* que Iberdrola utiliza para el análisis de plantas de biomasa, con el objetivo de que ambas se retroalimenten y que Iberdrola pueda contar con una única herramienta a la hora de analizar este tipo de proyectos.

7.4.2 Resultados asociados a la puesta en marcha y explotación de una Planta de Biomasa

Los resultados obtenidos para la hipótesis de una planta de biomasa de 10MW, funcionando al 50% con cultivos energéticos y al 50% con residuo forestal (*Pinus halepensis*) son los siguientes:

Generación de Riqueza y Mantenimiento de Empleo

Resultados Creación de Riqueza Anualizados (Euros de 2013)	
PIB	8.397.997 €
Mantenimiento de Empleo	142
Retornos Fiscales	2.342.383 €
Impuesto de Sociedades	379.303 €
IRPF	1.486.415 €
IVA	476.665 €

Contribución Social y Medioambiental

Resultados Sociomedioambientales Anualizados		
Emisiones evitadas al año	64.509	Menor emisión de Toneladas (t) CO ₂ frente a combustible fósil
Efecto depurativo equivalente	3.225.432	Número de árboles
Toneladas equivalentes de petróleo (tep)	6.883	t petróleo ahorradas / año
Ahorro por la no importación de petróleo	4.049.409	Euros / año
Empleo directo generado en Planta	18	Puestos de trabajo en planta

Tras desarrollar el proyecto, estudiar el ciclo de vida y las distintas fases de una planta de biomasa, analizar los agentes involucrados y medir la generación de riqueza y la contribución socio-medioambiental que conlleva una infraestructura energética de esta tipología, se pueden extraer los siguientes resultados:

Generación de Riqueza y Mantenimiento de Empleo

La construcción y explotación de una planta de biomasa tiene un impacto económico positivo en el entorno en el que se implanta. La fuerte inversión y los gastos asociados al desarrollo de esta infraestructura dinamizan un amplio abanico de sectores económicos, lo que a su vez conlleva una considerable generación de PIB y un mantenimiento de empleo que se mantiene durante las casi tres décadas de vida útil de la planta.

Retornos Fiscales a la Administraciones Públicas

La dinamización económica que desencadenan los gastos e inversiones de este tipo de proyecto no solo se circunscriben a la generación de PIB y al mantenimiento de empleo, sino que también se materializan a través de la generación de retornos fiscales plasmados en un aumento de la recaudación vía Impuesto de Sociedades (IS), Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas (IRPF) y el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA).

La generación de ingresos para las Haciendas Públicas es un resultado clave del modelo presentado, dado que cuantifica el montante del ahorro que supone para la Hacienda Pública los retornos impositivos derivados de las actividades desarrolladas en torno a un proyecto de construcción y explotación de una planta de biomasa.

Contribución Socio-medioambiental

Además de servir como catalizador y dinamizador económico, la puesta en marcha de una planta de biomasa también provoca una contribución en el entorno social y medioambiental donde se ubica. En relación con este aspecto, se ha de destacar que la generación de energía a través de la biomasa evita, en comparación con los

combustibles fósiles tradicionales, una cantidad significativa de emisiones de CO₂, así como un ahorro potencial por la menor importación de petróleo, un hecho clave para rebajar la dependencia energética de una región o país. Por último, la puesta en marcha de una planta de biomasa conlleva la creación de empleo directo en la propia instalación (que varía según la potencia de la planta), siendo gran parte de este empleo de media-alta cualificación.

Actividades Anexas

La producción de energía a través de la biomasa no solo conlleva una generación de actividad económica y de riqueza por la propia existencia de la instalación, sino que puede ayudar al desarrollo de otras actividades, como la puesta en marcha de un cultivo energético asociado.

Este tipo de cultivo actuaría como suministrador de biomasa a la planta, reforzaría la cadena de valor de la misma y conllevaría la puesta en marcha de una tipología de actividad muy interesante para dinamizar socio-económicamente el medio rural.

8

- Conclusiones y recomendaciones para la gestión

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN

Las conclusiones principales que se han obtenido son:

1. Respecto a la prevención de incendios
 - Los trabajos selvícolas para la obtención de biomasa son poco relevantes desde el punto de vista de prevención de incendios, al no cambiar el modelo de combustible, a no ser que se actué a gran escala, extrayendo gran cantidad de biomasa en las zonas de pasto y matorral, el cual es muy abundante en todos los estratos. Estas labores tienen unos costes muy altos a la vez que se obtiene un material de baja calidad para la combustión, es por ello que la biomasa no puede sufragarlas.
 - Con la gestión de las zonas arboladas se consigue reducir su densidad aparente, pero no es así con los perímetros de las zonas simuladas. Al añadir el resto de tratamientos, desbroces, para conseguir modelos de combustible más óptimos, se denotan diferencias significativas en la gestión de los modelos de matorral y pasto matorral, por lo que la aplicación de tratamientos exclusivamente sobre la masa arbolada, no consigue lo esperado en términos de prevención de incendios.
 - El tratamiento sólo del estrato arbóreo no modifica ni el comportamiento del fuego de superficie ni el área ardida en fuego de copas.
 - Las claras unidas a desbroces en superficie disminuirían la intensidad del incendio (control con medios directos más eficaz) y el área ardida por fuego de copas. El tratamiento del matorral unido a claras fuertes podría reducir en un 50% el área afectada por fuegos de copas en Enguera a corto plazo, con la consecuente disminución de la erosión y mortalidad del arbolado post-incendio. Estos resultados se tendrían que matizar a medio y largo plazo teniendo en cuenta la intensidad de desbroce realizada y el crecimiento del matorral. En cualquier caso y teniendo en cuenta que el tratamiento propuesto sería el óptimo desde el punto de vista de disminución del riesgo de incendios, dicho riesgo persiste y no evita la posibilidad de fuegos pasivos de copa, aunque sí de fuegos activos de copa.
 - La implantación de tratamientos de desbroce de matorral y clara fuerte en franjas de 100 y 200 m apoyadas en los cortafuegos sería efectiva en disminuir la intensidad y el área potencialmente ardida en un incendio en Enguera. En concreto, la implantación de tratamientos de desbroce y clara fuerte en los cortafuegos en franjas de 100 y 200 m disminuiría el área potencialmente ardida en un incendio en simulación libre durante las 5 primeras horas en 36% (100 m) y 47% (200 m) del total de las 3.377 ha potencialmente ardidadas en el escenario actual.
 - El abandono de la agricultura modifica los modelos de combustible, pasando de ser una zona no combustible a tener valores, de pasto-matorral, por lo que se debe de tener en cuenta en la gestión de la zona y en las medidas de prevención
2. Respecto a la obtención de biomasa
 - La biomasa a costes competitivos procedería en su mayoría de la madera de fustes de los árboles de mayor tamaño (especialmente, los procedentes de las cortas de regeneración en las masas más densas), resultando la biomasa más cara la procedente de los claros en masas espesas de monte bravo post-incendio, que precisamente son más interesantes a la hora de la prevención de incendios.
 - La posibilidad de biomasa total en el macizo del Caroig asciende a 6.870 toneladas verdes, mientras que la biomasa de calidad y a un coste total en planta competitivo es bastante reducida, alrededor de 2.600 t/año.

3. Respecto a la fabricación de pellets.
 - El sobrecoste que conlleva la fabricación de pellets sólo sería asumible por problemas logísticos, ya que no supone una mejora en la combustión.
 - El negocio térmico de 7.000 toneladas verdes de material forestal es difícilmente sostenible, ya que se trata de poco volumen para las inversiones que hay que hacer en equipos y maquinaria.
4. Respecto a la posibilidad de instalación de una central
 - Con las cantidades obtenidas de biomasa no se puede afrontar la instalación de una central termoeléctrica o de cogeneración debido a su escaso tamaño, lo que dificultará la rentabilidad del proyecto.
 - Se tendría que buscar fuentes alternativas de biomasa, como pueden ser los cultivos energéticos o la biomasa forestal de zonas aledañas. Debido a la ubicación de estas nuevas fuentes de combustible, la ubicación de la central tendría que ser en la zona oeste del macizo del Caroig, municipio de Ayora por ejemplo.
5. Respecto a la creación de riqueza de una planta de biomasa
 - Para una planta de 10MW funcionando al 50% con residuos forestales y al otro 50% con cultivos energéticos:

Resultados Creación de Riqueza Anualizados (Euros de 2013)		
PIB		8.397.997 €
Mantenimiento de Empleo		142
Retornos Fiscales		2.342.383 €
Impuesto de Sociedades		379.303 €
IRPF		1.486.415 €
IVA		476.665 €
Resultados Sociomedioambientales Anualizados		
Emisiones evitadas al año	64.509	Menor emisión de Toneladas (t) CO ₂ frente a combustible fósil
Efecto depurativo equivalente	3.225.432	Número de árboles
Toneladas equivalentes de petróleo (tep)	6.883	t petróleo ahorradas / año
Ahorro por la no importación de petróleo	4.049.409	Euros / año
Empleo directo generado en Planta	18	Puestos de trabajo en planta

- Se observa como se genera una elevada aportación al PIB, así como una generación de empleo importante estable a lo largo de la vida de la planta.
- Respecto a los ingresos para la hacienda pública, éstos vienen representados por los retornos fiscales. Se puede observar como la biomasa produce grandes retornos, lo cual es un elemento importante a considerar por parte del Estado a la hora de decidir ayudas para la inversión en biomasa.
- La biomasa también contribuye en el entorno social y medioambiental, con el ahorro de emisiones contaminantes, el empleo generado en el medio rural o el petróleo ahorrado por citar algunos ejemplos.

Anexo



Relación
bibliográfica

ANEXO I - RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y AGRADECIMIENTOS

RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE SELVICULTURA Y GESTIÓN DE MASAS ARBOLADAS DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS MILLER*) O SOBRE DIRECTRICES Y ESTIMACIÓN DE EXISTENCIAS EN LAS ÁREAS ESTUDIADAS

Se identificaron los siguientes textos de interés:

- Beltrán M, Pique M, Vericat P, Cervera T. Models de gestio per als boscos de pi blanc. Ed. CTFC – CPF. 124 pag. 2011.
- Cabanillas A M. Bases para la gestión de *Pinus halepensis Mill.* en el Valle del Ebro. Tesis Doctoral. UPM, 2010.
- Del Río M, Calama R y Montero G. Selvicultura de *Pinus halepensis Mill.* En Serrada R et al (Eds.): Compendio de Selvicultura Aplicada en España. INIA, 2008.
- Ifn3 – Valencia. Resumen de las características de los estratos. MAGRAMA, 2006.
- Montero G, Cañellas I y Ruiz-Peinado, R. Growth and Yield Models for *Pinus halepensis Mill.* Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Vol. 10 (1), 2001.
- Montero, G, Ruiz-Peinado R y Muñoz M. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. 270 pág. Monografías INIA: Serie Forestal. N°13 – 2005.
- Patfor: Documento propositivo. Recomendaciones selvícolas. Pag. 394-402. Generalitat Valenciana, 2012.
- Radinganorum. Inventario para el Proyecto de Ordenación de los montes de Enguera y Moixent. En fase de redacción (2013).
- Reineke, L.H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. Journal of Agricultural Research 46:627-638 (1933).
- Tolosana E, Vignote S y González V. El Aprovechamiento maderero. 2ª Edición. 628 pág. Ed. Mundiprensa y Fucovasa. Madrid, 2004.
- Varios Autores: «La selvicultura del pino carrasco». Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 10 (2000).

RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE RENDIMIENTOS MEDIOS E INTERVALOS PARA LOS DIFERENTES SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO

Se identificaron los siguientes textos de interés:

- Aidima, 2011: Estudio sobre el aprovechamiento integral de biomasa en Enguera. 85 pág.
- Arnó, J. Y Massip, J., 2003: "El cost horari de la maquinaria forestal". Edita: Diputació de Barcelona. Àrea d'Infraestructures, Urbanisme i Habitatge. Oficina Tècnica de Prevenció Municipal d'Incendis Forestals. 98 pág.
- Bergvist, I. & Glöde, D., 2004: Corridor cleaning – a method with great potential. Skogforsk Results N°3 - 2004.
- Carrascosa, A., 2013: Comunicación personal del responsable de I+D de TRAGSA sobre experiencias con multitaladora en claros y claras sobre repoblaciones de pino carrasco en Valladolid.
- Lerma, V., 2013: Comunicación personal sobre resultados de experiencias sobre latizal en el seno del Proyecto LIFE + "Bioenergy & Fire prevention".
- López, I; Rodríguez, J. Navarro, P. J., 2013: Demo Report – Multi-tree harvesting head in Catalonia (Spain). Informe del Proyecto INFRES – Innovative and effective technology and logistics for forest residual biomass supply in the E.U.
- Lorensi do Canto, J., Klepac, J., Rummer, B., Savoie, P. y Seixas, F., 2011: "Evaluation of two round baling systems for harvesting understory biomass. Biomass & Bioenergy 35 (2011) 2163-2170.
- 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.
- Otero, J.M., 2013: Comunicación personal sobre precios y costes de operaciones de abastecimiento contratadas por Iberdrola Renovables.
- Rueda, J. A., 2013: Biomasa forestal de la Comunidad valenciana: estado actual y futuro. Presentación en el seno del proyecto PROFORBIOMED.
- Tolosana E., V. M. González y S. Vignote, 2004: "El aprovechamiento maderero". Editorial Mundi Prensa & FUCOVASA. 675 pág.
- Tolosana E., 2009: "Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal". Editorial Mundi Prensa y FUCOVASA. 355 pág.
- Tolosana, E., 2009. Manual Técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Ed. MundiPrensa y Fucovasa. 375 pág.
- Tolosana, E., 2010: Estudio de evaluación de costes de abastecimiento de biomasa de origen forestal para la planta en proyecto por RWE en La Vega (área de Requena, Valencia). Informe no publicado.
- Velázquez, B., Gracia, C., Carrascosa, R., Félix, I. y Mari, A., 2007. Informe "Cuantificación de la biomasa forestal con posible destino energético obtenida en la Comunidad Valenciana". Proyecto BIOVAL "Optimización del aprovechamiento energético de los recursos biomásicos en la Comunidad Valenciana".
- Experiencias de operaciones forestales de Iberdrola Renovables.

RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE REFERENCIAS AL ALMACENAMIENTO DE BIOMASA

Se identificaron los siguientes textos de interés:

- Buggeln R., Rynk R. (2002): “*Self-Heating in yard trimmings: conditions leading to spontaneous combustion*”, Compost Science and Utilization, vol. 10, n° 2, pp. 162-182.
- Proyecto *LIGNOCROP*: “*INVESTIGACIÓN EN CULTIVOS PARA COMBUSTIÓN*”: Ministerio de Ciencia e Innovación, PlanE I+D Ref. CC09-063, encomienda de gestión AEG09-059 Entidades participantes: UCLM, INIA, IVIA, IBERDROLA RENOVABLES.
- Anon. (1998): “*Storage of wood chips*” Office of the Fire marshal of Ontario pp5. Referenciado en Garstang, J., et al. (2002): “*Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices.*” DTI’s New and Renewable Energy Programme.
- Jirjis, R. (2005): “*Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted Salix viminalis.*” Biomass and Bioenergy vol. 28, pp 193-201.
- Fuller, W.S. (1985): “*Chip pile storage –a review of practices to avoid deterioration and economic losses*” Tappi Journal, 68. Referenciado en Garstang, J., et al. (2002): “*Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices.*” DTI’s New and Renewable Energy Programme.
- Idler, Ch., et al. (2005): “*Loos reduced storage of short rotation coppice.*” Agricultural Engineering, Research papers 37, vol 1, pp. 124-134.
- Thörnqvist, T. (1984): “*Hyggesrester som råvaror för energiproduktion – Torking, lagring, hantering och kvalitet (Logging residues as a feedstock for energy production – Drying, storing, handling and grading)*”. SLU, Inst. för virkeslära, Rapport No. 152, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): “*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*” Biomass and Bioenergy vol. 28 pp 444-453.
- Garstang, J., et al. (2002): “*Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices.*” DTI’s New and Renewable Energy Programme.
- Ortiz, L. (2005): “*Tecnologías de producción de los biocombustibles sólidos*”, I Jornada sobre Biocombustibles Sólidos para Usos Térmicos y Co-combustión. Madrid.
- Ortiz, L. (1996): “*Aprovechamiento energético de la biomasa forestal*”. Ed. Gamesal.
- Baldini, S. (1986): “*Forest biomass for energy in ECC countries from harvesting to storage*” Instituto per la ricerca sul legno consiglio nazionale delle ricerche. Florence. Incluido en: Ferrero G.L., Grassi G., Williams H.E. (1987): “*Biomass energy: From harvesting to storage*”. Editorial Elsevier, London.
- España, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2004): “*Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales*”, BOE n° 303, de 17 de diciembre de 2004.
- Pari L., Ciriello A., Galluci F. (2008): “*Consequence of SRF poplar wood harvesting method on energy content preservation*”, Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, Spain, pp 571-522.
- Gigler, J.K. et al. (2000): “*Natural wind drying of willow stems*”, Biomass and Bioenergy, vol. 19, pp 153-163.

- Estudio FAO (1978): “*Las astillas de Madera: su producción, manipulación y transporte*”. Roma.
- Thörnqvist, T. (1983): “*Lagring av sönderdelade hyggesrester (Storing of disintegrated logging residuals)*” Severiges lantbrunskuniversitet, Inst. för virkeslära, Rapport No. 137, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): “*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*” Biomass and Bioenergy vol. 28 pp 444-453.
- Thörnqvist, T. (1983): “*Bränsleflisens förändring under ett års lagring*”. Severiges lantbrunskuniversitet, Inst. för virkeslära, Rapport No. 148, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): “*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*” Biomass and Bioenergy vol. 28 pp 444-453.
- Thörnqvist, T. (1990): “*Projekt storskalig säsonglagring av trädbränsle – en sammanfattning av etapp 1 (Large-scale seasonal storage of tree fuel project-summary of phase 1)*”. SLU, Inst. för virkeslära, Rapport No. 188, Uppsala. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): “*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*” Biomass and Bioenergy vol. 28, pp 444-453.
- Jirjis R., Lehtikangas P., Oskarsson R. (1993): “*Terminallagring av bränsleflis*”. Projekt skogskraft, Rapport No. 16/93. Referenciado en Wihersaari, M. (2005): “*Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue.*” Biomass and Bioenergy vol. 28, pp 444-453.
- Gilserud, O. (1990): “*Drying and storing of comminuted wood fuels.*” Biomass, vol. 22, pp 229-244.
- Jirjis, R. (1995): “*Storage and drying of wood fuel.*” Biomass and Bioenergy, vol. 9, pp 181-190.
- W. Hogland, M. Marques (2003) “*Physical, biological and chemical processes during storage and spontaneous combustion of waste fuel Resources*”, Conservation and Recycling, Volume 40, Issue 1, Pages 53-69.
- Rugar-Gadd K. (2006) “*Biomass Pre-treatment for the Production of Sustainable Energy – Emissions and Self-ignition*” Acta Wexionensia No 88/2006 Bioenergy Technology Thesis for the degree of Doctor of Technology, Växjö University, Sweden. Series editors: Tommy Book and Kerstin Brodén ISSN: 1404-4307 ISBN: 91-7636-501-8 Printed by: Intellecta Docusys, Göteborg.
- Chou, Francis E. Jenney Jr., Michael WW. Adams, Robert M. Kelly (2008) “*Hydrogenesis in hyperthermophilic microorganisms: Implications for biofuels*” Metabolic Engineering, Volume 10, Issue 6, November Pages 394-404.
- Clausen C. A. (1996) “*Bacterial associations with decaying wood: a review*” International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 37, Issues 1-2, Pages 101-107.
- Rogers G.; Jackson S.; Shelper G.; Baecker A. (1992) “*Anaerobic degradation of lignocellulosic substrates by a 1,4 beta – xylanolytic Clostridium species novum*” International Biodeterioration & biodegradation 29 3-17.
- Baeta-Hall L., Säägua M. C., Bartolomeu M., Anselmo A. M. Rosa M. F. (2005) “*Bio-degradation of olive oil husks in composting aerated piles*” Bioresource Technology 96 pág. 69–78.
- Lothner, D.P. Bradley and R.L. Gambles (1988) “*Economic evaluations of short rotation biomass energy systems*”. Proc. IEA/BA Task II workshop, 1-1-3 August 1987, Duluth, USA. IEA/BA Information Report 88:2. ~23-39. Citado en Mitchell C. P. (1995) “*New cultural treatments and yield optimization*” Biomass and Bioenergy vol. 9 1-5: 11 – 34.
- Bullard M.; Heaton R. Nixon P. (2004) “*Winkleigh biomass electricity generator*” Environmental statement Volume 3 Biomass Fuel Assessment Bio- Renewables LTD.

- Deutmeyer, M. (2007): “Strategies for supply of raw material in the energy industry”. Biomass to liquids, Choren.
- Miller, J. D., Laflamme, A. M., Sobel, Y., Lafontaine, P. & Greenhalgh, R. (1988). “Fungi and fungal products in some Canadian houses. *Int. Biodeterioration*”, 24, 103-20.
- Monn, C. (2001) “Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone”. *Atmospheric environment* 35, s 1-32 citado en Rupar-Gadd K. (2006) “Biomass Pre-treatment for the Production of Sustainable Energy – Emissions and Self-ignition” Acta Wexionensia No 88/2006 Bioenergy Technology Thesis for the degree of Doctor of Technology, Växjö University, Sweden 2006 Series editors: Tommy Book and Kerstin Brodén ISSN: 1404-4307 ISBN: 91-7636-501-8 Printed by: Intellecta Docusys, Göteborg 2006.
- Nordic Innovation Centre “Guidelines for storing and handling of solid biofuels nordtest” method 1 (18) ISSN: 1459–2800 Project: 06180 NT ENVIR 010 www.nordicinnovation.net .
- Katarina Rupar, Mehri Sanati (2003) “The release of organic compounds during biomass drying depends upon the feedstock and/or altering drying heating medium” *Biomass and Bioenergy* 25 615 – 622.
- Katarina Rupar-Gadd, Mohammad Bagher Bagherpour, Göran Holmstedt, Ulrika Welander, Mehri Sanati. (2006) “Solid phase micro extraction fibers, calibration for use in biofilter applications” *Biochemical Engineering Journal* 31 107–112.
- Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) “The release of terpenes during storage of biomass” *Biomass and Bioenergy* 28 29–34.
- Nammari, Di. , Hogland, W., Marques, M., Nimmermark, S., Moutavtchi, V., (2004). “Emission from uncontrolled fire in municipal solid waste bales”. *Waste Management* 24, 9–18. Citado en Moqbel S., Reinhart D., Chen R. H. (2010) “Factors influencing spontaneous combustion of solid waste *Waste Management*” 30 1600–1607.
- Kasanen J-K, Pasanen A-L, Pasanen P. (1999) “Evaluation of sensory irritation of D3-carene and Turpentine, and acceptable levels of monoterpenes in occupational and indoor environment”. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A* 56:89–114, citado en Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) “The release of terpenes during storage of biomass” *Biomass and Bioenergy* 28 29–34.
- Demers PA, Teschke K, Kennedy SM. (1997) “What to do about softwood? A review of respiratory effects and recommendations regarding exposure limits”. *American Journal of Industrial Medicine* 31: 385–98. Citado en Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) “The release of terpenes during storage of biomass” *Biomass and Bioenergy* 28 29–34.
- Falk-Filipsson A. (1995) “Toxokinetic and acute effects of inhalation exposure to monoterpenes in man”. Arbetsmiljö institutet, Arbete och Hälsa 3. ISBN: 91-7045-294-6. Citado en Katarina Rupar, Mehri Sanati (2005) “The release of terpenes during storage of biomass” *Biomass and Bioenergy* 28 29–34.
- Camps, M. y Marcos, F. (2001): “Los biocombustibles”. Colección energías renovables. Ed. Mundi Prens.
- Buatas, E. (1983) “Utilització de residus de fusta com a combustible industrial”. Generalitat de Catalunya. Departament d’Indústria i Energia.
- Springer, E.L. (1980), “Should whole-tree chips for fuel be dried before storage?” United States Department of Agriculture. Forest Service.

RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA RELATIVA A LA EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA FORESTAL PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS

- Agee J.K., Bahro B., Finney M., OMI P., Sapsis D., Skinner C., VAn Wagtenonk J.W., Weatherspoon P., 2000. The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *Forest Ecology and Management* 127, 55-66.
- Anderson H.E., 1982. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behaviour. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report.
- Appa (de Gregorio M. coord.), 2012. Balance económico de la actualización de las retribuciones a la producción eléctrica a partir de las biomásas. Asociación de Productores de Energías Renovables. Madrid. 30 pp.
- Brotons L., Aquilue N. de Cáceres M., Fortin M.J. y Fall A., 2013. Factores que afectan al régimen de incendios en los paisajes mediterráneos: interacciones entre el cambio climático, las estrategias de extinción y la historia previa de incendios. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz. Disponible on-line www.congresoforestal.es.
- Duralde M.A., Tolosana E., de Gregorio M. (Madrigal J. Coord.), 2012. El aprovechamiento energético de la biomasa forestal y la prevención de incendios. Conclusiones de la Jornada de Debate SELVIRED-FIRESMART. INIA. Madrid. 15 pp. Disponible on line http://www.firesmart-project.eu/docs/workshop_selvired/Conclusiones_Jornada_SELVIRED-FIRESMART.pdf.
- ESRI, 2012. Pertenencia difusa (Spatial Analyst) en Centro de Recursos de ArcGIS 10. Disponible on-line: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z000000rn000000>.
- Fernández-Alonso, J.M., Vega Hidalgo, J.A., Álvarez-González, J. G., Alberdi, I., Ruiz-González, A.D., Cañellas, I. Y Jiménez Carmona, E., 2013. Sensibilidad al fuego de copas en las masas de pinares de la provincia de Pontevedra. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria 2013. Disponible on- line www.congresoforestal.es.
- Fernández Migueláñez I. (2013). Evaluación de la eficacia para la prevención de incendios del aprovechamiento energético de la biomasa forestal en el macizo de Caroig (Valencia, España). Proyecto Fin de Máster en Tecnologías de la Información Geográfica. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid. Disponible on-line <http://www.eprints.ucm.es/23804/>.
- Finney, M. A., 2004. Farsite: Fire Area Simulator–model development and evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Guijarro M., 2003. Comportamiento del fuego y régimen térmico en diferentes complejos de combustible forestal. Tesis Doctorales INIA. Serie Forestal. Ministerio de Ciencia y Tecnología. INIA. Madrid.
- Jiménez E., Vega J.A., Fernández C., Fontúrbel M.T., Pérez-Gorostiaga P., 2013a. Evaluación de la eficacia de tratamientos preventivos en matorral mediante el físico de predicción de comportamiento del fuego WFDS. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria 2013. Disponible on- line www.congresoforestal.es.
- Jimenez E., Vega J.A., Fernandez-Alonso J.M., Vega-Nieva D., Alvarez-Gonzalez J.G., Ruiz-Gonzalez A.D.. 2013b. Allometric equations for estimating canopy fuel load and distribution of pole-size maritime pine trees in five Iberian provenances *Can. J. For. Res.* 43: 149–158 (2013) [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2012-0374](https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0374).

- Madrigal, J., C. Hernando, M. Guijarro, C. Díez, E. Jiménez. 2006. Distribución de biomasa y fijación de carbono tras claros mecanizados intensos en regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. (Monte «Fraguas», Guadalajara, España). Invest Agrar: Sist Recur For (2006) 15(2), 231-242.
- Marino E., Guijarro M., Hernando C., Madrigal J., Díez C., 2011 Fire hazard after prescribed burning in a gorse shrubland: implications for fuel management. J Environ Manage; 92(3): 1003–1011.
- Marino E., Dupuy J.L., Pimont F., Guijarro M., Hernando C., Linn R., 2012. Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: a comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels. J Fire Sci 31: 131-142.
- Mitsopoulos I. D., A. P. Dimitrakopoulos. 2007a. Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. International Journal of Wildland Fire, 16, 642–647.
- Mitsopoulos I. D., A. P. Dimitrakopoulos . 2007b. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. Ann. For. Sci. 64 (2007b) 287–299.
- Molina, D.M., Martínez E.R., García D., 2006. Farsite simulations for cost-efficient wildland fire planning: Case studies in Spain. Forest Ecology and Management 234S.
- Montero G., Ruiz-Peinado R., Muñoz M., 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA. Serie Forestal n° 13.
- Pimont F., Dupuy J.L., Linn R.R., 2009. Validation of FIRETEC wind-flows over a canopy and a fuel-break. Int J Wildland Fire 2009; 18: 775–790.
- Quílez R., Chinchilla S., 2013. Caracterización de modelos de combustible en la provincia de Valencia. FLAMMA. Vol. 3, Cap. 2, pp 31-40.
- Regos A., Brotons L., Aquilué N. Y De Cáceres M., 2013. Uso de estrategias oportunistas de extinción para reducir el impacto de los incendios en condiciones climáticas extremas. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz. Disponible on-line www.congresoforestal.es
- Rothermel R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper No. INT-115, Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Scott J.H., Burgan R.E., 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Secf, 2013; La situación de los bosques y el sector forestal en España. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Disponible on-line <http://www.secforestales.org/web/images/ISFE/isfe2013.pdf>.
- Stephens S., 1998. Evaluation of the effects of silvicultural and fuels treatments on potential fire in Sierra Nevada mixed-conifer forests. Forest Ecology and Management 105.
- Stephens S.L. y Moghaddas J., 2005. Experimental fuel treatment impacts on forest structure potential fire behaviour and predicted tree mortality in a California mixed conifer-forest. Forest and Ecology and Management 215, 21-36.
- Tolosana E., Madrigal J., Planelles R., Hernando C., Guijarro M., Fernández I., 2013. Propuesta de línea de base selvícola para la producción sostenible de biomasa y la prevención de incendios en los pinares de carrasco de Moixent-Enguera. Documento interno.

- Van Wagner C.E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal Forest Research 7, 23-34.
- Van Wagner C.E., 1983. Simulating the effect of forest fire on long term annual timber supply. Can. J. For. Res. 13.
- Vega, J.A., Jimenez E., Vega D. J., Ortiz L., Pérez J.R..2011. *Pinus pinaster Ait.* tree mortality following wildfire in Spain. Forest Ecology and Management 261, Issue 12, 15 June 2011, Pages 2232-2242.
- Vélez R., 2009. La Defensa contra Incendios Forestales. Fundamentos y experiencias. McGrawHill.

AGRADECIMIENTO

Agradecer su colaboración para la elaboración de este documento a las siguientes personas:

Roberto Alcaráz. *Consortio Provincial de Bomberos de Valencia.*

Raúl Quilez. *Consortio Provincial de Bomberos de Valencia.*

José Antonio Alloza. *Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo - CEAM-UMH.*

Ramón Vallejo. *Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo - CEAM-UMH.*

Rafael Curras. *Centro para la Investigación y Experimentación Forestal de la Comunidad Valenciana.*

Rafael Calvo. *TRAGSA.*

Francisco Navarro. *VAERSA.*

Álvaro Escrip. *VAERSA.*

M^a Victoria Fernández de Córdoba. *Asociación de Propietarios Forestales de la Comunidad Valenciana.*

Javier Hermoso. *Consellería de Infraestructuras, Territorio y Medioambiente de la Generalitat Valenciana.*

José Antonio Rueda. *Consellería de Infraestructuras, Territorio y Medioambiente de la Generalitat Valenciana.*

Manuel García. *Asociación de Propietarios Forestales del Macizo del Caroig.*

Santiago Arévalo. *Asociación de Municipios Forestales de la Comunitat Valenciana.*

Victoria Lerma. *AIDIMA.*

Silvana Daguerre. *Econova Ambiental SL.*

Eduardo Calabuig. *Maderas Soler.*

Roberto de Antonio. *FactorVerde.*

Emilio González. *Generalitat Valenciana.*

Jorge Suarez. *Servicio de prevención y extinción, Conselleria de Gobernación, Generalitat Valenciana.*

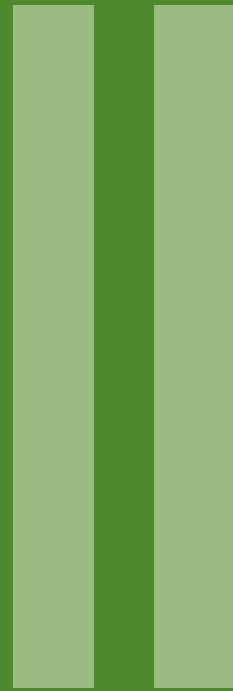
Paco Garcia. *Ex gerente de Trabisa.*

Judith Rodríguez. *Centro Tecnológico Forestal de Cataluña.*

Ignacio López Vicens. *Centro Tecnológico Forestal de Cataluña.*

Pere Navarro Maroto. *Centro Tecnológico Forestal de Cataluña.*

Anexo



Elaboración y
caracterización de
biocombustibles
sólidos y pruebas de
combustión

ANEXO II ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS Y PRUEBAS DE COMBUSTIÓN

Se pretende estudiar la susceptibilidad de los residuos forestales provenientes de las zonas de estudio a ser pelletizados, estudiando las características de los mismos y sus posibles usos. Más adelante, se harán pruebas de combustión de estos pellets y se compararán con la combustión de astillas.

Para elaborar este estudio, se ha contado con la colaboración del departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales perteneciente a la Universidad de Castilla-La Mancha.

1. INTRODUCCIÓN AL PELLETIZADO

La primera parte del trabajo ha consistido en el estudio experimental del proceso de pelletizado de dos especies de pino, *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, con el fin de aumentar tanto su densidad energética (crucial para la logística y el almacenamiento) como el grado de homogeneidad (el carácter heterogéneo de la biomasa determina, entre otros, el tipo de tecnología de combustión y las prestaciones de la caldera). El pelletizado de biomasa se encuentra dentro de las principales estrategias para el uso e impulso de este combustible renovable en Europa (como señalan, por ejemplo, la European Climate Foundation y la European Biomass Association) y, aunque puede no ser un proceso adecuado en el rango de altas potencias debido al coste económico que conlleva, resulta muy interesante para aplicaciones donde la producción de energía térmica sea el principal objetivo (sectores doméstico, servicios e industrial).

Para realizar este estudio se han ensayado diferentes grados de humedad y compresión de la materia prima. Para cada una de las condiciones estudiadas se ha realizado la caracterización física del pellet obtenido (humedad, durabilidad, contenido en finos y densidad) y, para las condiciones óptimas, se ha determinado también su caracterización química. Además, se han clasificado los pellets fabricados dentro de las diferentes categorías marcadas por la normativa Europea para Biocombustibles sólidos (EN 14961-2), que identifican el mejor aprovechamiento de los mismos.

A continuación se detalla la metodología empleada, los ensayos realizados y los resultados obtenidos del pelletizado y análisis de calidad del pellet resultante.

2. PELLETIZADO

2.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Se dispone de una planta de pelletizado marca Skid Sinte 1000 con una capacidad de producción de 100 kg/h y una potencia activa instalada de 18 kW. La planta está dotada de un molino y una tolva de homogeneización, así como de matrices de compresión y un sistema de aspiración y filtros manga para disminuir la formación de polvo en la sala. La instalación se muestra en la figura 1. El proceso de pelletizado en su conjunto consta de varias etapas que se detallan a lo largo de este apartado.



Figura 1. Planta piloto pelletizado.

2.2. MATERIAS PRIMAS PARA EL PELLETIZADO

En abril de 2013 se reciben aproximadamente 550 kg de astillas de dos especies de pino, *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, provenientes de los estudios de campo realizados dentro del proyecto. Estas materias primas son las que se han utilizado para llevar a cabo la optimización del proceso de pelletizado.

2.3. METODOLOGÍA DE ENSAYO

2.3.1 Pretratamiento

Antes de someterse al pelletizado, el material tiene que ser sometido a una serie de tratamientos orientados a cambiar y mejorar sus características físicas.

Dentro de estos tratamientos tendremos:

2.3.1.1 Secado

Dependiendo del tipo de biomasa el contenido en humedad óptimo para su pelletizado es variable. En cualquier caso siempre ha de ser inferior al 35 % (% en masa), por lo que normalmente la biomasa se ha de someter a una primera etapa de secado natural.

Las astillas de *Pinus halepensis* se reciben con una humedad del 49 %, mientras que la humedad del *Pinus pinaster* es del 35 %. Por tanto, para su secado natural se extienden en una sala, habilitada para ello, en condiciones de temperatura y humedad ambiente. Las astillas son volteadas periódicamente para favorecer la evaporación del agua hasta que se alcanza una humedad comprendida entre el 15 y el 25 % en masa (apta para la molienda).



Figura 2. Secado natural de astilla de *Pinus halepensis* según se recibe.

2.3.1.2 Molienda

Se lleva a cabo mediante un molino de martillos con una potencia de 7,5 kW eléctricos y un tamiz de luz de malla de 4 mm. La biomasa es alimentada al molino a través de una tolva con un sinfín horizontal, a la que a su vez se le alimenta el material mediante un portabigbags.



Figura 3. Molino de martillos planta piloto de pelletizado.

2.3.1.3 Acondicionamiento

La humedad del material antes de entrar a la matriz de compresión (Mt) es un parámetro determinante a la hora del proceso de pelletizado y de la calidad final del pellet. El ajuste de la humedad se lleva a cabo mediante secado natural si está en exceso o mediante humidificación si está en defecto. Para la humidificación se dispone de una tolva con un nebulizador y unas aspas giratorias que favorecen la homogeneización de la mezcla.

2.3.2 Compresión

Desde la tolva de homogeneización la biomasa se alimenta mediante tornillo sinfín a la matriz de compresión cuyo eje se hace girar por un motor de 11 kW de potencia.

En la figura 4 se aprecian los orificios que tiene dispuestos la matriz de compresión en todo su perímetro y los dos rodillos que giran en el interior de ésta. El proceso de compresión ocurre debido a la resistencia que encuentra el material molido al atravesar dichos orificios para, presionado por los dos rodillos, salir desde el interior hasta el exterior de la matriz.

El grado de compresión (c) necesario para el pelletizado es un parámetro que depende del tipo de biomasa. Viene dado por la distancia que ha de atravesar el material dentro de los orificios de la matriz antes de salir de la misma en forma de pellet. Se dispone de matrices de 14 mm, 19 mm, 21 mm y 24 mm, siendo el grado de compresión de la de 14 mm menor que el de la de 24 mm. El diámetro de los orificios es en todas las matrices de 6 mm.

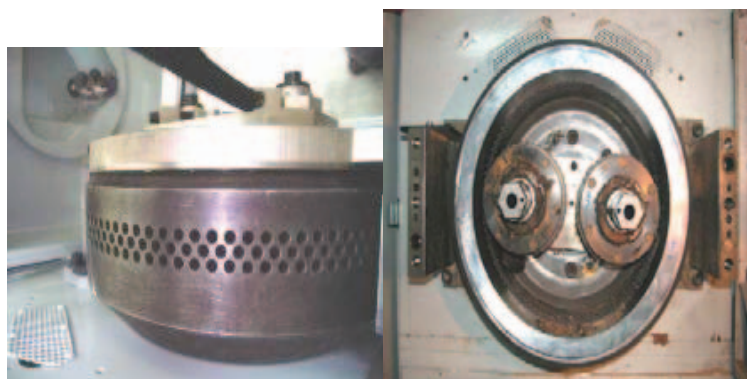


Figura 4. Matriz de compresión.

Con el objetivo de alcanzar las condiciones óptimas de pelletizado se han utilizado dos grados de compresión, 19 mm y 21 mm ya que según bibliografía y la experiencia de la Sección Biomasa son los más adecuados para el material seleccionado. Además en cada ensayo se han ajustado y registrado la frecuencia de alimentación de la materia prima a la matriz de compresión (f_a), la intensidad eléctrica media consumida por la matriz (I_m) y la temperatura máxima de la matriz (T_m), variables autorreguladas por el control interno de la planta y que son indicativas de la marcha del proceso de pelletizado.

Los pellets recién fabricados se extienden durante un día para su secado natural. De esta forma se alcanza la humedad de equilibrio con la atmosfera, es decir, la humedad final del pellet (M_p).

La tabla 1 muestra los grados de humedad previos al pelletizado (M_t , % masa) utilizados con las dos especies de pino y la compresión (c , mm) utilizada.

Muestra	c (mm)	Mt (% masa)
<i>Pinus halepensis</i>	19	15
		32
	21	18
		23
		25
		28
		31
		33
<i>Pinus pinaster</i>	21	23
		25
		28
		31

Tabla 1. Acondicionamiento materia prima.

2.3.3 Análisis de la calidad física del pellet

La calidad física del pellet se evalúa en base a su humedad (M_p), durabilidad (DU), densidad aparente (D_{ap}), densidad de partícula (D_p), longitud (L), diámetro (d) y contenido en finos (F) según el procedimiento descrito a continuación.

2.3.3.1 Durabilidad mecánica

Los ensayos de durabilidad se han llevado a cabo de acuerdo con la norma experimental *UNE-CEN/TS 15210-1 EX "Métodos para la determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1"*. Dicha norma define la

durabilidad (DU) como el porcentaje en masa de pellets que queda después de someterlos a un ensayo de golpes controlados en una cámara de ensayo rotativa (10 minutos centrifugando a 50 rpm).

Sobre una muestra de 500 ± 10 gramos, se eliminan los finos mediante cribado manual con tamiz de 3,15 mm. Después se somete la muestra al ensayo de centrifugado. Se vuelve a hacer un cribado para separar los finos generados durante el proceso, anotando el peso del material que no atraviesa la malla de 3,15 mm. La durabilidad se expresa como:

$$DU = \frac{m_a}{m_e} \times 100$$

donde m_a es la masa de material que, después del tratamiento de centrifugado, no atraviesa la malla de 3,15 mm, m_e es la masa de pellets pre-cribados antes del centrifugado y DU es la durabilidad expresada en tanto por ciento en masa.

2.3.3.2 Contenido en finos

El contenido en finos (F) de una muestra de pellets se obtiene por cribado en la forma en que se indica en la norma *UNE-CEN/TS 15210-1 EX* de durabilidad, y se expresa como

$$F = \frac{m_f}{m_i} \times 100$$

donde m_f es la masa de material que ha pasado la malla de 3,15 mm, m_i es la masa inicial de la muestra y F es el contenido en finos expresado en tanto por ciento en masa. El ensayo se realiza sobre una muestra de 500 ± 10 gramos.

El contenido en finos no es en este trabajo una característica del pellet, sino que se emplea como indicativo de la calidad del proceso de pelletizado, pues dice cuánto material ha compactado con respecto a todo el material que entra en la matriz.

2.3.3.3 Densidad aparente

Siguiendo la norma *UNE-CEN/TS 15103 EX*. "Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la densidad aparente", se determina empleando un recipiente de 5 litros (V) y una balanza de precisión 0,1 gramos. Para llenar el recipiente (de masa m_1), los pellets se dejan caer desde una cierta altura (20-30 cm); después se sacude el recipiente contra el suelo un par de veces para que se asiente el material, y se rellena el espacio que ha quedado libre con más pellets. Tras pesar el recipiente lleno (m_2), la densidad aparente (D_{ap}) se obtiene como sigue (haciendo el ensayo dos veces para obtener el valor medio):

$$D_{ap} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

2.3.3.4 Densidad de partícula y dimensiones

Para el cálculo de la densidad de partícula se necesita conocer la masa y volumen del pellet. La masa se obtiene por pesada en una balanza con precisión 0,0001 gramos y el volumen se estima siguiendo el método estereométrico del Anexo A de la norma *UNE-CEN/TS 15150 EX*. "Biocombustibles sólidos. Métodos para determinación de la densidad de partículas". Este método se basa en la medida de las dimensiones longitud y diámetro de la partícula para determinar el volumen de la forma geométrica a la que se asemeja el pellet, un cilindro. Se usa como instrumento de medida un calibre con precisión de 0,01 mm. El ensayo se realiza a una muestra de 10 pellets tomada de forma representativa.

2.3.4. Caracterización química del pellet

Las características químicas del pellet son propiedades intrínsecas de la materia prima utilizada para la fabricación del mismo. El proceso de pelletizado es un tratamiento físico del material y por tanto no modifica sus propiedades. No obstante, a los pellets fabricados, se les han determinado aquellas propiedades químicas determinantes para clasificar el pellet según la norma europea *EN 14961-2 "Solid Biofuels. Fuel specification and classes-Part 2: Wood pellet for non industrial uses"*.

A continuación se describe la metodología y los equipos utilizados para llevar a cabo las determinaciones.

2.3.4.1 Preparación de la muestra

Del total de los pellets fabricados se toma una sub-muestra representativa mediante cuarteo y se muele en un molino de cuchillas (Retsch SM 100). Si bien las normas exigen un tamaño máximo de partícula de 1 milímetro, se sigue moliendo hasta 0,5 mm, con el fin de obtener una mayor repetitividad en los análisis.

2.3.4.2 Procedimientos y equipos empleados

2.3.4.2.1 Determinación de la humedad del pellet (M_p)

La humedad del pellet se determina metiéndolo en la estufa sin realizar ninguna modificación previa, ni de secado, ni de triturado. El ensayo se realiza sobre una muestra de aproximadamente 300 gramos, con la estufa a 105 ± 2 °C. La muestra se tiene en la estufa durante al menos 16 horas, aumentándose el ciclo de secado en períodos de 2 horas hasta que se compruebe que el material ya no pierde más agua. La humedad se determina a partir de la pérdida de peso de la muestra hasta alcanzar un valor constante, expresándose en tanto por ciento en masa en base húmeda.

Para la determinación se sigue la norma europea *EN 14774-1 "Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia"*.

2.3.4.2.2 Determinación del contenido en cenizas a 550°C

Como resultado de dicho análisis se obtiene el contenido en cenizas expresado en porcentaje en masa. Se sigue la norma *EN 14775 "Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas"*.

El contenido en cenizas se determina a partir de la masa inicial de la muestra y de la masa de residuo que queda tras calentar la muestra bajo condiciones específicas. La muestra se somete a un proceso de calentamiento en atmósfera de aire en un horno mufla HOBERSAL 12PR/400 "PAD" y bajo condiciones rigurosamente controladas de períodos de tiempo y temperatura. La temperatura máxima alcanzada en el proceso de calentamiento es de (550 ± 10) °C. Se establece esta temperatura final para contabilizar todo el material inerte, incluyendo aquellos elementos inertes que pueden volatilizarse a temperaturas superiores y los carbonatos que se descomponen también a temperaturas superiores. Las rampas de calentamiento establecidas son:

- 5°C/min hasta alcanzar los 250°C
- Isoterma a 250°C durante 60 minutos
- 5°C/min hasta alcanzar 550 ± 10 °C
- Isoterma a 550°C durante 120 min

Tras someter la muestra a estas rampas se vuelve a introducir la muestra en el horno (a 550°C) durante períodos adicionales de 30 minutos hasta que el cambio de masa sea menor de 0,2 mg.

Se realiza el ensayo con muestra húmeda y se determina la humedad de la muestra simultáneamente al ensayo con el fin de expresar el resultado en base seca.

2.3.4.2.3 Determinación del contenido en nitrógeno (N) y azufre (S)

Como resultado de este análisis se obtiene el porcentaje en masa de nitrógeno y azufre de la muestra.

La determinación se realiza sobre muestra estabilizada al aire. Simultáneamente se determina la humedad de la misma con el fin de expresar los resultados en base seca.

Se utiliza un analizador elemental marca LECO modelo TruSpec. Este equipo realiza la combustión en atmósfera altamente oxidante, de una cantidad de muestra entre 100 mg y 400 mg, en función de densidad de la muestra y la composición esperada. Los gases de la combustión se dirigen a distintas celdas en las que se contabiliza individualmente el porcentaje de cada elemento. El contenido en azufre se determina mediante absorción de infrarrojos y el contenido en nitrógeno mediante conductividad térmica

El procedimiento utilizado deriva de la norma experimental *UNE-CEN/TS 15104 EX Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales* y *UNE-EN 15289. "Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro"*.

2.3.4.2.4 Determinación del poder calorífico

El procedimiento deriva de la norma *UNE 164001 EX "Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del poder calorífico"*.

Experimentalmente se determina el poder calorífico superior a volumen constante de la muestra de ensayo. El poder calorífico superior en base seca e inferior en base seca y con un contenido en humedad cualquiera se determinan a partir del resultado experimental y una serie de expresiones (ecuaciones 1, 2, y 3).

A continuación se explica de forma resumida cómo se obtienen los distintos poderes caloríficos.

Poder calorífico superior a volumen constante de la muestra de ensayo ($PCS_{v,a}$)

Se parte de la muestra para análisis, cuyo tamaño de partícula es igual o inferior a 0,5 mm, tamaño necesario para asegurar una combustión completa y una buena reproducibilidad en los resultados. Esta muestra se estabiliza al aire en recipiente abierto durante al menos 24 h. Esta muestra, ya estabilizada al aire, es la que se denomina muestra de ensayo.

La muestra de ensayo se somete a una combustión con exceso de oxígeno en un calorímetro marca PARR modelo 6.100. A partir del incremento de temperatura que sufre el baño de agua en que está sumergida la bomba en la que se produce la combustión, el equipo determina el poder calorífico superior a volumen constante de la muestra de ensayo ($PCS_{v,a}$).

Simultáneamente al ensayo con el calorímetro se determina la humedad en base húmeda de la muestra de ensayo (M_a), siguiendo la norma experimental *UNE-EN 14774-3 EX. "Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad por el método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general"*, con el fin de determinar el poder calorífico superior en base seca.

Poder calorífico superior a volumen constante en base seca ($PCS_{v,b,s}$)

Se determina a partir del valor experimental ($PCS_{v,a}$), del conocimiento de la humedad en base húmeda de la muestra de ensayo (M_a) y la expresión 1:

$$PCS_{v,b,s.} = \frac{PCS_{v,a}}{\left(1 - \frac{M_a}{100}\right)} \quad (1)$$

donde:

$PCS_{v,b,s.}$ es el poder calorífico superior a volumen constante en base seca (kJ/kg)

$PCS_{v,a}$ es el valor experimental del poder calorífico superior a volumen constante de la muestra de ensayo (kJ/kg)

M_a es el contenido en humedad en base húmeda de la muestra de ensayo (% masa)

Poder calorífico inferior a presión constante en base seca ($PCI_{p,b,s.}$)

Las máquinas que queman o transforman combustibles sólidos (calderas, hornos, gasificadores) son máquinas de flujo continuo. En estas máquinas, los procesos de combustión ocurren a presión constante, por lo que el poder calorífico que tiene interés es el correspondiente a presión constante.

Se determina a partir del valor del poder calorífico superior en base seca, $PCS_{v,b,s.}$ y de los contenidos en hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en base seca determinados en el análisis elemental. La expresión que permite obtener el poder calorífico inferior a presión constante en base seca es la siguiente:

$$PCI_{p,b,s.} = PCS_{v,b,s.} - 212,2H_{b,s.} - 0,8(O_{b,s.} + N_{b,s.}) \quad (2)$$

donde

$PCI_{p,b,s.}$ es el poder calorífico inferior a presión constante en base seca (kJ/kg)

$PCS_{v,b,s.}$ es el poder calorífico superior a volumen constante en base seca (kJ/kg)

$H_{b,s.}$ es el contenido en hidrógeno en base seca (% masa)

$O_{b,s.}$ es el contenido en oxígeno en base seca (% masa)

$N_{b,s.}$ es el contenido en nitrógeno en base seca (% masa)

Poder calorífico inferior a presión constante a una humedad M cualquiera ($PCI_{p,h}$)

La expresión que permite determinar este valor es la siguiente:

$$PCI_{p,h} = PCI_{p,b,s.}(1 - 0,01M) - 24,43M \quad (3)$$

donde

$PCI_{p,h}$ es el poder calorífico inferior a presión constante del combustible con humedad h (kJ/kg), en base húmeda

$PCI_{p,b,s.}$ es el poder calorífico inferior a presión constante en base seca (kJ/kg)

M es el contenido en humedad en base húmeda (% masa)

2.3.4.2.5 Análisis de elementos minoritarios en la muestra

Se determinan los porcentajes en masa de los diferentes elementos químicos presentes en la muestra. Se realiza según procedimiento interno que deriva de las norma experimental EN 15297. "Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos minoritarios".

Previo al análisis, las diferentes muestras se someten a una digestión ácida en un digestor de microondas (modelo Ethos 1 de la marca Milestone). La digestión consiste en la disolución de la muestra en una mezcla de ácido nítrico, clorhídrico y fluorhídrico. Esta mezcla se calienta hasta 220°C a 11,3°C/min y se mantiene a dicha temperatura durante 15 minutos. La disolución resultante se neutraliza por adición de ácido bórico y calentamiento hasta 150°C lo más rápido posible, manteniendo esta temperatura durante 15 minutos. Después de la digestión, la muestra es analizada en un Espectrofotómetro de Emisión Óptica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES 715-ES de la marca Varian).

Para la realización de este ensayo no se disminuye el tamaño de partícula del combustible. Previo al ensayo se estabiliza la muestra al aire. Simultáneamente al ensayo se determina la humedad del combustible.

3. RESULTADOS

3.1 RESULTADOS DERIVADOS DE LA COMPRESIÓN

La intensidad eléctrica media consumida por la matriz (I_m) y la frecuencia de alimentación de la materia prima en la matriz de compresión (f_a) están directamente relacionadas, ya que al aumentar la cantidad de biomasa que se alimenta a la matriz, ésta ha de trabajar más y aumenta su consumo eléctrico. Se ha mantenido la frecuencia de la matriz cercana a 3 Hz para evitar problemas de atascos y paradas de la matriz. Tan solo en la muestra de *Pinus halepensis*, cuando se ha utilizado un grado de compresión de 21 mm, se ha aumentado la frecuencia a 12 - 13 Hz. Como se observa en la tabla 2 este aumento en la frecuencia da lugar a una mayor temperatura y consumo de la matriz.

Muestra	C (mm)	Mt (%)	F_a (Hz)	T_{max} (°C)	I_m (A)
<i>Pinus halepensis</i>	19	15	3,0	72,1	18,0
		32	3,0	72,2	17,5
	21	18	12,3	76,5	20,7
		23	13,4	75,2	20,7
		25	3,0	73,8	17,8
		28	3,0	71,4	17,9
		31	3,0	71,3	17,6
		33	3,0	71,5	17,5
<i>Pinus pinaster</i>	21	23	3,0	73,6	17,5
		25	3,0	74,0	17,6
		28	3,0	71,5	17,9
		31	3,0	71,2	17,9

Tabla 2. Parámetros de pelletizado derivados del grado de compresión utilizados

En todos los casos, a similar frecuencia de alimentación, la temperatura y la intensidad de la matriz similar para las dos especies de pino.

La figura 5 muestra una imagen de los pellets obtenidos en cada una de las condiciones ensayadas.



Figura 5. Pellets producidos en cada condición de pelletizado

3.2 RESULTADOS DE CALIDAD DEL PELLET

La calidad física del pellet se evalúa en base a su humedad final (M_p), durabilidad (DU), densidad aparente (D_{ap}), densidad de partícula (D_p), longitud (L), diámetro (d) y contenido en finos (F).

La tabla 3 muestra los resultados de los diferentes indicadores de calidad de los pellets producidos en función del grado de compresión aplicado en cada ensayo y de la humedad de la materia prima en la tolva antes de pelletizar (M_i) junto con los valores que clasifican al pellet en las diferentes categorías según la norma europea 14961-2 "Solid Biofuels. Fuel specification and classes-Part 2: Wood pellet for non industrial uses".

Se observa que tanto para el *Pinus halepensis* como para el *Pinus pinaster* se han encontrado las condiciones óptimas de pelletizado que, según los parámetros físicos de calidad, permite clasificar los pellets obtenidos con la máxima categoría (EN A1). Estas condiciones son para el *Pinus halepensis* una compresión de 21 mm y una humedad del material (M_t) del 25 % y para el *Pinus pinaster* una compresión de 21 mm y una humedad del material (M_t) del 28 %.

	Grado de compresión (mm)	Mt	a	M _p	DU	D _{ap}	D _p	L	d	F
		(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(g/m ³)	(mm)	(mm)	(%)
	Parámetros EN 14961-2	A1	≤ 2	≤ 10	≥ 97,5	≥ 600	-	3,15 ≤ L ≤ 40	6,0 ± 1,0	≤ 1,0
		A2	≤ 2	≤ 10	≥ 97,5	≥ 600	-	3,15 ≤ L ≤ 40	6,0 ± 1,0	≤ 1,0
		B	≤ 2	≤ 10	≥ 96,5	≥ 600	-	3,15 ≤ L ≤ 40	6,0 ± 1,0	≤ 1,0
<i>Pinus halepensis</i>	19	15	0	-	-	-	-	-	-	-
		32	0	-	-	-	-	-	-	-
	21	18	0	9	93,2	759	1,1 ± 0,1	24,6 ± 7,6	6,1 ± 0,1	1,9
		23	0	10	97,3	639	1,1 ± 0,1	17,2 ± 8,6	6,0 ± 0,0	1,6
		25	0	10	97,6	690	1,1 ± 0,1	19,4 ± 6,4	5,9 ± 0,1	1,8
		28	0	11	97,2	614	0,9 ± 0,1	21,3 ± 9,6	6,1 ± 0,2	2,5
		31	0	9	96,1	724	1,1 ± 0,1	17,9 ± 6,4	5,9 ± 0,1	2,3
		33	0	14	95,8	533	0,8 ± 0,1	18,5 ± 7,5	6,3 ± 0,1	1,2
<i>Pinus pinaster</i>	21	23	0	10	96,8	727	1,0 ± 0,2	17,3 ± 10,2	5,9 ± 0,1	1,9
		25	0	10	97,1	706	1,0 ± 0,1	13,8 ± 4,5	5,9 ± 0,1	1,7
		28	0	10	97,7	728	1,0 ± 0,1	13,8 ± 5,2	5,9 ± 0,0	1,5
		31	0	17	96,9	426	0,7 ± 0,1	20,6 ± 8,2	6,4 ± 0,1	2,2

Tabla 3. Resultados de calidad del pellet para cada condición y especie ensayada.

La matriz de compresión utilizada para la producción de pellets de las dos especies de pino ha sido de 21 mm. Tan solo se ha utilizado la matriz de 19 mm en la producción de pellets de la muestra de *Pinus halepensis*. Se ha observado que con este grado de compresión no es posible obtener pellets debido a que se trata de madera dura y por tanto requiere grados de compresión elevados para su pelletizado. En el caso del *Pinus halepensis* como punto de partida se ha fijado una humedad del material (*M*) del 18 % obteniéndose pellets con un 9 % de humedad, valor inferior al 10 % que se establece como límite en la norma EN14961-2. A pesar de esto y al no alcanzarse los valores mínimos de otros de los parámetros utilizados para la clasificación del pellet con la máxima categoría (EN A1), se han utilizado otros cinco grados de humedad (23, 25, 28, 31 y 33 %). Se observa que un aumento en el porcentaje de humedad del material aumenta la humedad del pellet final. El porcentaje máximo determinado, que nos permite obtener pellets con un porcentaje de humedad inferior al máximo permitido (10 %), es de 25 %.

En el caso de *Pinus pinaster* se han probado cuatro grados de humedad, 23, 25, 28 y 31 %. Excepto con el mayor porcentaje de humedad, 31 %, todos los pellets fabricados tienen un contenido en humedad del 10 %.

Para las dos especies de pino y excepto para humedades del material muy elevadas, en todas las condiciones estudiadas de humedad y con un grado de compresión de 21 mm, la densidad aparente de los pellets producidos es superior al mínimo establecido en las tres categorías A1, A2 y B (600 kg/m³). Se ha comprobado que una humedad excesiva del material (*Mt*) da lugar a pellets con una densidad por debajo del mínimo necesario para ser clasificado.

Además se ha observado un aumento de la durabilidad del pellet al aumentar la humedad del material (*Mt*), hasta llegar a un valor máximo de humedad a partir del cual se produce el efecto contrario, es decir, una disminución de la durabilidad al aumentar la humedad del material. Para el *Pinus halepensis* la durabilidad máxima, superior al 97,5 % (límite inferior para clasificar el pellet como A1), se ha conseguido con una humedad del material (*Mt*) del 25 % y para el *Pinus pinaster* con una humedad del material del 28 %.

En todos los casos, longitud y diámetro están comprendidos en el intervalo permitido por la norma.

En cuanto al contenido en finos, en casi todos los casos se encuentra por encima del máximo establecido. En cualquier caso se considera éste parámetro como un indicador de calidad del proceso de pelletizado y no del pellet ya que en todas las condiciones mediante cribado se alcanzaría un contenido en finos inferior al 1 % normativo.

Además de los parámetros físicos, existen parámetros químicos determinantes a la hora de establecer la calidad del pellet. La tabla 4 muestra dichos parámetros para cada uno de los pellets producidos junto con los límites de cada uno de ellos según la EN 4961-2.

Propiedad	Pinus halepensis						Pinus pinaster				PARÁMETROS EN 14961-2		
	21						21						
Mt	18	23	25	28	31	33	23	25	28	31	A1	A2	B
M (% masa)	9	10	10	11	9	14	10	10	10	17	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Base seca			Base húmeda (10%)			Base seca		Base húmeda (10%)				
PCI (MJ/kg)	18,63			16,52			19,39		17,21		16,5≤Q≤19 ²	16,3≤Q≤19 ²	16,0≤Q≤19 ²
Cenizas (% masa)	1,58			1,42			1,85		1,66		≤ 0,7 ¹	≤ 1,5 ¹	≤ 3,0 ¹
N (% masa)	0,15			0,14			0,25		0,23		≤ 0,3 ¹	≤ 0,5 ¹	≤ 1,0 ¹
S (% masa)	0,03			0,02			0,02		0,02		≤ 0,03 ¹	≤ 0,03 ¹	≤ 0,04 ¹
Cl (% masa)	0,01			0,01			0,01		0,01		≤ 0,02 ¹	≤ 0,02 ¹	≤ 0,03 ¹
	Base seca						Base seca						
Arsénico (mg/kg)	0,9						0,8				≤ 1 ¹		
Cadmio (mg/kg)	*b.l.d						*b.l.d				≤ 0,5 ¹		
Cromo (mg/kg)	4						9				≤ 10 ¹		
Cobre (mg/kg)	1						1				≤ 10 ¹		
Plomo (mg/kg)	*b.l.d						*b.l.d				≤ 10 ¹		
Mercurio (mg/kg)	*b.l.d						*b.l.d				≤ 0,1 ¹		
Níquel (mg/kg)	*b.l.d						3				≤ 10 ¹		
Zinc (mg/kg)	10						5				≤ 100 ¹		

¹Base seca ² base húmeda * b.l.d: por debajo del límite de detección

Tabla 4. Parámetros químicos de calidad del pellet

El contenido en cenizas es el parámetro más restrictivo a la hora de clasificar el pellet como EN A1, A2 o B. El contenido en cenizas de un material es muy importante a la hora de ser quemado en calderas domésticas ya que se ha comprobado que son las causantes de problemas durante la combustión. En la tabla 4 se observa que, para las dos especies de pino, debido a este parámetro, y sin tener en cuenta los parámetros físicos de calidad, todos los pellets producidos son de calidad B. Posiblemente un descortezado de la madera previo al astillado reduciría el contenido en cenizas de la misma y por tanto podría adquirir una calidad superior.

El poder calorífico inferior en base húmeda de los pellets de las dos especies es, en todos los casos, superior a 16,5 MJ/kg (b.h.) clasificándose, atendiendo a este parámetro, como EN A1.

Además el contenido en cloro, azufre, nitrógeno, arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc en ambas especies también es inferior a los valores límite para la clasificación del pellet como EN A1. De nuevo estos parámetros no van a condicionar la clasificación del pellet.

Por tanto, a excepción del contenido en cenizas, los parámetros químicos de todos los pellets producidos cumplen con la clasificación más exigente, la EN A1. Sin embargo, debido al contenido en cenizas superior al 1,5 % (base seca) las dos especies de pino se encuentran dentro de la categoría EN B.

4. CONCLUSIONES DEL PELLETIZADO

A continuación se resumen las principales conclusiones del estudio:

- Según la caracterización química de los pellets producidos, y teniendo en cuenta todos los parámetros analizados, las dos especies de pino ensayados se encuentran, según la norma *EN 14961-2*, dentro de la categoría B y por tanto pueden ser utilizados en calderas domésticas que admitan este tipo de pellets.
- A excepción del contenido en cenizas, todas las propiedades químicas de los pellets caracterizados cumplen con los parámetros de calidad EN A1, por lo que un descortezado de la materia prima (previo al pelletizado) o cualquier otro método de disminución del contenido en cenizas de la misma permitiría mejorar la calidad del pellet.
- Se han obtenido las condiciones óptimas de pelletizado para las dos especies de pino que, según los parámetros físicos, dan lugar a pellet de calidad EN A1, que son:
 - *Pinus halepensis*:
 - Grado de compresión: 21 mm
 - Humedad de la materia prima antes de la compresión: 25 % en masa
 - *Pinus pinaster*:
 - Grado de compresión: 21 mm
 - Humedad de la materia prima antes de la compresión: 28 % en masa
- Excepto con humedades muy elevadas, para las dos especies de pino, en todas las condiciones estudiadas de humedad y con un grado de compresión de 21 mm, la densidad aparente de los pellets producidos es superior al mínimo establecido (600 kg/m³) en las tres categorías *EN 14961-2*.
- Se ha observado un aumento de la durabilidad del pellet al aumentar la humedad del material (*Mt*), hasta llegar a un valor máximo de humedad a partir del cual se produce el efecto contrario, es decir, una disminución de la durabilidad al aumentar la humedad del material.

5. INTRODUCCIÓN A LA COMBUSTIÓN

El trabajo aquí presentado consiste en el estudio experimental del proceso de combustión de pellets de dos especies de pino, *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, y su comparación con la combustión de astillas de ambas especies.

Para realizar este estudio se han fabricado 150 kg de pellets de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster* en las condiciones que, según las conclusiones sacadas anteriormente, permiten obtener pellets de mayor calidad física. Dichos pellets se han quemado en una caldera doméstica de 55 kw con el objetivo de estudiar el rendimiento y emisiones de la misma. Los resultados obtenidos han sido comparados con los de la combustión de astillas de ambas especies (resultados obtenidos de un trabajo previo realizado dentro del proyecto Life Best Practices and Technologies to Develop Green Wastes and Residues as Raw Materials for Variants of Utilization) para, por un lado, determinar las ventajas del pelletizado en cuanto a prestaciones de la caldera se refiere y, por otro lado, detectar posibles modificaciones requeridas en los equipos para poder operar con ambos tipos de tamaño/densidad de biomasa.

A continuación se detalla la metodología empleada, los ensayos realizados y los resultados obtenidos en la combustión de las dos especies de pino.

6. COMBUSTIÓN

6.1 PRESENTACIÓN DE LA PLANTA

Los ensayos de combustión de biomasa se han llevado a cabo en una caldera marca Fröling modelo Turbomatic cuya potencia nominal es de 55 kW térmicos. Se trata de una caldera doméstica totalmente monitorizada, de tipo piro-tubular, lecho fijo, con distribución de aire (primario y secundario), parrilla vibrante y eliminación automática de cenizas. Debido al carácter experimental que tiene la instalación, las variables más significativas del proceso de combustión como temperaturas, caudales y composición de los humos generados en el proceso son registradas y monitorizadas durante los ensayos. Para ello se dispone de diferentes instrumentos de medida como caudalímetros, termopares, sonda lambda y un analizador de emisiones en continuo. La figura 6 muestra un esquema de la instalación.

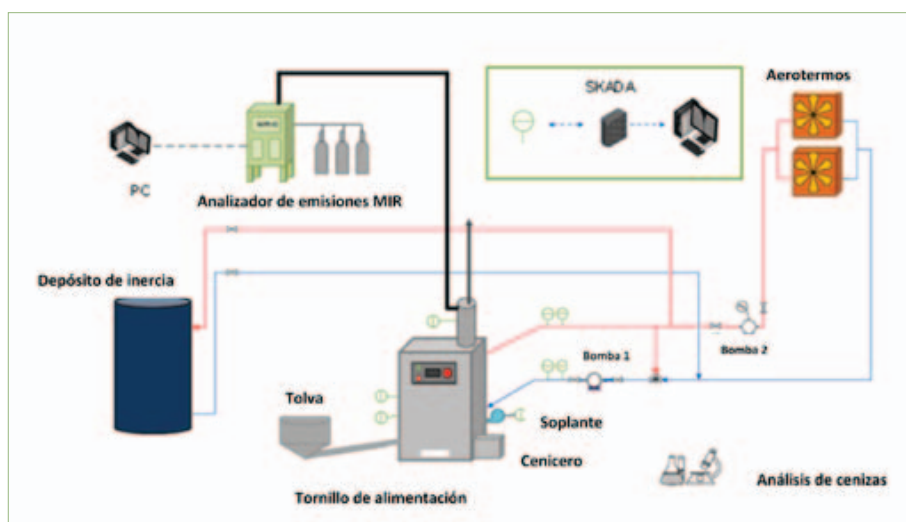


Figura 6. Esquema de la planta piloto de combustión

A continuación se describe brevemente la instalación:

Sistema de alimentación de biomasa y aire

El sistema de alimentación consta de una tolva, dos tornillos sinfín y un sistema de seguridad antirretorno de llama. El combustible se carga manualmente en la tolva de almacenamiento y el primer tornillo, denominado de carga, lo transporta hasta un volumen intermedio donde se encuentra el tornillo de alimentación que suministra el combustible lateralmente en el quemador. El ajuste del tiempo en el que los tornillos están funcionando está relacionado con el caudal de biomasa utilizado y depende de la potencia térmica necesaria y del tipo de biomasa ensayada. Entre los dos tornillos se encuentra el sistema de seguridad anti-retorno de llama.

En la fase de encendido de la caldera, exclusivamente para que se inicie la combustión, se insufla aire caliente mediante un encendedor eléctrico. Durante la combustión, el aporte de aire se realiza mediante una soplante cuyo caudal se divide en aire primario y secundario. El aire primario se introduce por los agujeros de la parte inferior de la parrilla (perpendicularmente al lecho) y el aire secundario se introduce por las paredes del quemador. El caudal total de aire que aporta la soplante se mide experimentalmente con un caudalímetro instalado en la conducción. La proporción de aire primario y secundario se regula a través de dos válvulas de mariposa.

Cámara de combustión

Se encuentra separada del intercambiador de calor y está provista de un revestimiento de ladrillos refractarios donde se encuentran los orificios de entrada del aire secundario. La parte inferior dispone de una parrilla vibratoria de 20 cm² con diversos orificios por donde entra el aire primario de combustión y caen las cenizas generadas, y donde es alimentado el lecho de combustible. Las temperaturas en la cámara de combustión oscilan entre 600- 800°C, dependiendo de las condiciones experimentales.

Ceniceros

La caldera está dotada de dos ceniceros para la recogida de residuos sólidos. Bajo el quemador hay un tornillo sinfín que transporta los residuos que caen al vibrar la parrilla hacia el cenicero 1. El cenicero 2 se encuentra situado en la zona de intercambio de calor. Las partículas que son arrastradas por los gases de combustión hasta esa zona se depositan en este cenicero por su densidad y/o acción de turbuladores.

Circuito de humos

Los gases generados en la combustión van desde la cámara de combustión hacia la chimenea realizando el intercambio de calor con el agua que se encuentra a su alrededor y alrededor del cuerpo de la caldera.

En el interior de los tubos del intercambiador de calor hay unos muelles helicoidales denominados turbuladores programados para que automáticamente vibren. Su función es doble: por un lado, hacen que el camino que han de recorrer los gases sea más tortuoso favoreciendo así el intercambio de calor con el agua; y por otro, sirven como mecanismo de limpieza al forzar que las partículas volantes en los humos se depositen.

A la salida del intercambiador de calor hay un ventilador inducido que mantiene la depresión dentro de la cámara de combustión y favorece la salida de los gases de combustión al exterior a través de la chimenea. A lo largo del recorrido de los gases de combustión se dispone de tres termopares: en el hogar de combustión, antes de los tubos del intercambiador y a la salida de los mismos (en el primer tramo de la chimenea).

Se dispone de una sonda lambda en el primer tramo de chimenea que se utiliza para determinar la concentración de oxígeno en los gases de combustión.

Por último, en la chimenea hay una sonda con la que se muestrean los gases de combustión que por efecto venturi son llevados al analizador de emisiones MIR-IS. Este analizador proporciona la concentración en continuo de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrocarburos (COT), oxígeno (O₂), agua (H₂O), dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en los gases de combustión. La concentración de CO se corrige al 13% de O₂ para evitar el efecto de dilución en los experimentos a diferentes valores de exceso de aire.

Circuito hidráulico

El circuito hidráulico consta de una serie de tuberías de acero inoxidable recubiertas de material aislante por donde circula el agua, dos bombas de impulsión de agua de velocidad regulable, una válvula termostática de tres vías que controla la temperatura del agua de retorno a la caldera, un depósito de inercia con estratificación forzada utilizado como sistema de seguridad y dos vasos de expansión que permiten absorber los aumentos de volumen del agua producidos por la elevación de su temperatura. Además se dispone de sensores de temperatura y caudal en las conducciones de ida y retorno a la caldera para la mejor monitorización del proceso de combustión.

Disipación de calor

El calor generado en la combustión y cedido al agua es disipado por dos aerotermos. El intercambio de calor en ellos se produce entre el aire a temperatura ambiente que circula por la carcasa y el agua que atraviesa una batería de tubos de cobre al tresbolillo.

Adquisición de datos

Para la adquisición de datos de la planta piloto se dispone el sistema de automatización SIMATIC S7 con software de programación Step 7, de SIEMENS. Las señales de los caudalímetros y sensores de temperatura de agua y humos son tratadas, almacenadas y visualizadas mediante el scada del sistema.

6.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

El aire total del proceso de combustión es la suma del aire primario y el secundario. Para asegurar una combustión completa es necesario trabajar en condiciones de exceso de aire (λ) y por tanto hay que definirlo antes del ensayo. El aire pasa desde la caldera a la chimenea y, dependiendo de temperatura de gas en la chimenea, este representa una pérdida de energía y por tanto de eficiencia térmica. Para sistemas de combustión de biomasa en parrilla, el exceso de aire se configura normalmente superior al 25 %.

Junto con el exceso de aire, el porcentaje de aire primario y secundario, *PA* y *SA*, respectivamente, son otros de los parámetros que han de ser optimizados. La relación aire primario/secundario suele ser 40/60 en calderas modernas de combustión de biomasa en parrilla, en lugar de 80/20 como ocurre en calderas antiguas utilizadas para combustibles fósiles. Esto se debe a la composición de la biomasa, ya que contiene aproximadamente un 80 % de material volátil y un 20 % de carbono fijo. La distribución de aire permite una zona primaria deficiente en oxígeno y una zona secundaria posterior rica en oxígeno.

El aire primario, suministrado desde la parte inferior de la parrilla a través de pequeñas aberturas, debe de ser suficiente para mantener y lograr una buena combustión en el lecho del combustible. El aire secundario, suministrado por los agujeros de las paredes del refractario de la cámara de combustión, es el responsable de la combustión de los volátiles y los gases emitidos. Este aire secundario produce una pequeña turbulencia que hace que aumente el tiempo de residencia de los gases y se consiga una mejor combustión. En estas condiciones, la combustión de las especies gaseosas es más rápida que la que tiene lugar en parrilla.

Una vez calibrado el sistema de alimentación y conocido el poder calorífico inferior de cada combustible, se han tomado caudales de alimentación de entre 9 y 10 kg/h, para alcanzar una energía térmica similar a la potencia nominal de la caldera. Para alcanzar estos caudales, y debido a la mayor densidad de los pellets frente a las astillas, se ha disminuido la frecuencia de alimentación de la caldera en torno a cuatro veces con respecto a la frecuencia necesaria para conseguir caudales similares con astillas.

El exceso de aire se ajusta en cada ensayo a través de un medidor de flujo de aire. Previamente, el aire estequiométrico se calcula de forma teórica a partir del análisis elemental de la muestra.

Con el fin de comparar el proceso de combustión de pellets y astillas de las dos especies de pino, se han realizado dos ensayos de combustión en las condiciones que, según el informe de combustión de astillas realizado para Iberdrola Renovables en mayo de 2012, se consideran óptimas para ambas especies, es decir, utilizando un exceso de aire de aproximadamente 1,4 y una relación de aire primario/ secundario de 30/70 (manteniendo constante la potencia de la caldera en torno a su valor máximo).

Las emisiones gaseosas y la eficiencia se han determinado una vez que se alcanza el régimen estacionario. Se considera que se alcanza dicho régimen quince minutos después de que los valores de temperatura de gases de combustión tengan una desviación estándar de valor medio inferior a cinco grados.

Para obtener la eficiencia del proceso de combustión existen dos normas que pueden ser utilizadas, la norma *EN 303-5* (potencias hasta 300 kW térmicos) y la *EN-14785* (potencias hasta 50 kW térmicos). La primera utiliza el denominado método directo para el cálculo de la eficiencia, definiéndola como la relación entre la energía suministrada y la energía producida. Se basa principalmente en la medida de la temperatura del agua y del caudal del agua y biomasa. La segunda calcula la eficiencia por el método indirecto, es decir, como 100 menos las pérdidas

de eficiencia en la combustión por los humos y por el residuo sólido, basándose principalmente en la composición del gas de combustión.

En el presente informe se han utilizado las dos normas para el cálculo de la eficiencia. A continuación se detallan el cálculo de eficiencia según las dos normas.

Según la *EN-14785* la eficiencia es calculada a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = 100 - q_a - q_b - q_r$$

q_a (%): porcentaje de pérdidas por calor sensible de los humos, con respecto al poder calorífico de la biomasa. Depende de la velocidad de flujo de los gases, la temperatura y el calor específico.

q_b (%): pérdidas de calor por inquemados gaseosos en los humos, con respecto al poder calorífico de la biomasa. Depende de la concentración de monóxido de carbono en el gas de combustión.

q_r (%): porcentaje de las pérdidas térmicas a través de los constituyentes combustibles de los residuos, con respecto al poder calorífico de la biomasa. Depende del porcentaje de residuo sólido respecto a la biomasa total alimentada (R) y del porcentaje de materia sin quemar respecto al residuo sólido total (b). Los valores de R y b se miden después de la limpieza de la caldera y antes del siguiente ensayo.

La potencia térmica (P , kW) se obtiene a partir de la eficiencia, la tasa de consumo de biomasa (m_{bio} , kg/h) y el poder calorífico inferior (PCI , kJ/Kg, base húmeda) de la biomasa. Se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{m_{bio} \times PCI \times \eta}{3600}$$

En la norma *EN 303-5* la definición de potencia térmica considera directamente la cantidad de calor cedida al agua, por tanto la eficiencia calculada a través de esta norma es menor que la calculada según la *EN 14785*. El método de cálculo de la eficiencia según la *EN 303-5* es el siguiente:

$$\eta = \frac{Q}{Q_b} \times 100$$

Q (kW): Cantidad de calor útil transmitido al agua por unidad de tiempo. Se calcula a partir del calor específico del agua, C_p , el caudal másico de agua m_w y el incremento de temperatura del agua, N , de la siguiente manera:

$$Q = C_p \times m_w \times N / 3600$$

Q_b (kW): Cantidad de energía por unidad de tiempo aportada por el combustible, es función del poder calorífico inferior. Se expresa de la siguiente manera:

$$Q_b = m_{bio} \times PCI$$

6.3 MATERIAS PRIMAS PARA LA COMBUSTIÓN

Para realizar los ensayos de combustión se han utilizado aproximadamente 150 kg de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*. Estos pellets han sido fabricados en la pelletizadora Sinke 1000 que dispone el Grupo de Combustibles y Motores de la UCLM (la descripción del equipo y metodología seguida se detallan en el informe de pelletizado), en aquellas condiciones determinadas como óptimas, es decir, que dan lugar a pellets con calidad física EN A1 (DU \geq 97,5 % y BD \geq 600 kg/m³).

7. RESULTADOS

7.1 EMISIONES Y RENDIMIENTO

Para comparar la combustión de pellets y astillas de las dos especies de pino se han realizado dos ensayos de combustión, uno con pellets de *Pinus halepensis* y otro con pellets de *Pinus pinaster*. Las condiciones utilizadas se presentan en la tabla 5. Se han incluido los datos de combustión de las astillas de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster* en todas las tablas para una mejor comparación de los resultados.

	m_{bio} (kg/h)	m_{air} (kg/h)	λ	PA (%)	SA (%)
Pellet <i>P. halepensis</i>	10,7	89,4	1,43	29,8	70,2
Pellet <i>P. pinaster</i>	9,7	87,3	1,46	29,6	70,4
Astillas <i>P. halepensis</i>	12,6	86,7	1,40	30,4	69,6
Astillas <i>P. pinaster</i>	12,4	87,3	1,42	30,6	69,4

Tabla 5. Condiciones de operación

Se observa que existen ligeras diferencias en las condiciones de operación en los ensayos con pellets y con astillas. Esto es debido a que al tratarse de ensayos experimentales existen diversos factores como temperatura exterior, humedad, etc. que no pueden ser controlados y que van a influir en el desarrollo de la combustión, modificando ligeramente las condiciones objetivo. Además, diferencias en cuanto a la densidad, humedad y tamaño de partícula de los pellets y astillas también puede dar lugar a diferencias en el caudal másico de biomasa alimentada durante el ensayo.

Para ambas especies de pino el caudal másico de biomasa empleado en los ensayos de pellets es inferior al de los ensayos con astillas (a igualdad de potencia). Pese a ser las mismas especies, se han observado diferencias en el poder calorífico inferior de las astillas recibidas en 2012 y las recibidas en 2013 (utilizadas para el pelletizado y de PCI algo superior). Esto puede ser debido a que, a pesar de ser las mismas especies de pino, las astillas recibidas para realizar cada estudio tienen contenidos distintos de corteza, ramas, etc., lo que modifica ligeramente sus propiedades químicas.

En la tabla 6 se muestran las variables que han sido registradas durante los ensayos como son el caudal másico de agua (m_w) en m^3/h , la temperatura del agua caliente (T_{hw}) en $^{\circ}\text{C}$, la temperatura del agua fría (T_{cw}) en $^{\circ}\text{C}$, la temperatura de humos en el hogar (T_{hh}) en $^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de los humos en la chimenea (T_{hc}) en $^{\circ}\text{C}$.

	m_w (m^3/h)	T_{hw} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{cw} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{hh} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{hc} ($^{\circ}\text{C}$)
Pellet <i>P. halepensis</i>	$3,95 \pm 0,06$	$74,05 \pm 0,75$	$65,00 \pm 0,56$	$628,10 \pm 20,17$	$166,50 \pm 2,65$
Pellet <i>P. pinaster</i>	$3,98 \pm 0,06$	$75,47 \pm 0,69$	$66,78 \pm 0,47$	$640,16 \pm 30,69$	$166,40 \pm 1,20$
Astillas <i>P. halepensis</i>	$4,82 \pm 0,07$	$71,57 \pm 0,70$	$63,34 \pm 0,61$	$693,31 \pm 37,34$	$168,16 \pm 2,97$
Astillas <i>P. pinaster</i>	$4,48 \pm 0,37$	$70,73 \pm 1,05$	$62,72 \pm 1,49$	$657,60 \pm 23,96$	$163,71 \pm 4,12$

Tabla 6. Variables medidas

El caudal de agua en el caso de los pellets de las dos especies de pino ha sido inferior al obtenido con astillas. En cuanto al incremento de temperatura en el agua ($T_{hw} - T_{cw}$, $^{\circ}\text{C}$), es superior para los ensayos con pellets. Ambos resultados conducen a que el calor transferido al agua sea similar en los ensayos de pellets y de astillas (mayor caudal en el caso de astillas pero menor salto térmico del agua).

Las temperaturas de humos en el hogar y en la chimenea son ligeramente inferiores en la combustión de pellets que en la de astillas, siendo inferior en el caso de los pellets de *Pinus halepensis*. No obstante estas diferencias se encuentran dentro de las desviaciones estándar determinadas para ambas temperaturas. Esto se debe a que tanto en el caso de los pellets como las astillas el exceso de aire es similar, lo que hace que la velocidad de los humos de combustión y su temperatura también lo sea.

Las concentraciones de O₂, CO₂, COT (carbono orgánico total, incluye el contenido en metano y otros hidrocarburos), NO_x, CO y SO₂ han sido medidas on-line durante los ensayos. La concentración de SO₂ se mantuvo por debajo de los límites de detección del equipo, debido a la baja concentración de azufre de la biomasa, y por tanto no se muestra en las tablas y gráficas. Los valores medios obtenidos, junto con sus desviaciones estándar, se muestran en la tabla 7 y figura 7.

	O ₂ (vol-%)	CO ₂ (vol-%)	COT (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO (13 % O ₂ , mg/m ³)
Pellet <i>P. halepensis</i>	7,71 ± 0,61	12,03 ± 0,53	116,23 ± 3,71	160,74 ± 4,98	452,01 ± 139,7	265,23 ± 78,87
Pellet <i>P. pinaster</i>	7,62 ± 0,73	12,33 ± 0,65	11,41 ± 1,14	195,11 ± 88,26	167,42 ± 104,43	119,82 ± 58,55
Astillas <i>P. halepensis</i>	6,04 ± 0,93	13,71 ± 0,81	42,01 ± 2,45	230,62 ± 42,87	366,01 ± 267,35	239,76 ± 166,05
Astillas <i>P. pinaster</i>	7,79 ± 0,72	12,08 ± 0,60	52,43 ± 1,56	124,11 ± 7,38	304,69 ± 83,81	230,50 ± 60,90

Tabla 7. Emisiones gaseosas

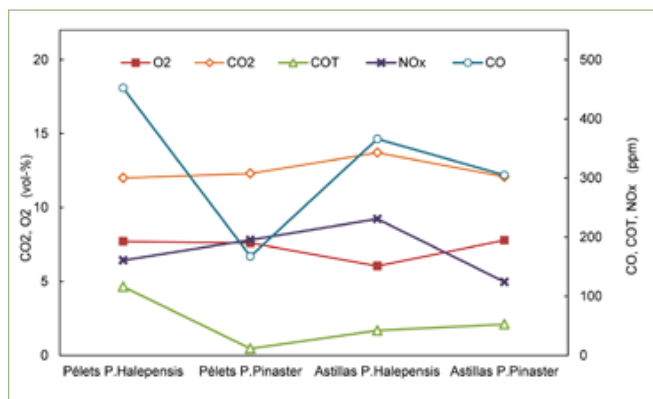


Figura 7. Emisiones gaseosas medias

El porcentaje de oxígeno en los humos de combustión es similar para pellets y astillas, en torno a 6-8 %, ya que los ensayos se han realizado a similar exceso de aire.

La concentración de CO en los humos es el principal parámetro para el cálculo de las pérdidas de eficiencia, junto con la temperatura de humos en la chimenea. Debido a la importancia de este compuesto, su concentración también ha sido calculada considerando un 13% de O₂ en los humos. De esta manera se elimina el efecto de la dilución y así se puede comparar la cantidad de CO con diferentes excesos de aire. Tanto en la combustión de pellets de las dos especies de pino como en la de astillas se observa que la concentración de CO se encuentra por debajo de los límites establecidos por la norma EN 14785 (500 mg/m³ de CO al 13 % O₂) y la norma EN 303-5 (3.000 mg/m³ de CO al 10%). La combustión de los pellet de *Pinus halepensis* presenta mayor concentración de CO en los humos que la combustión de astillas de la misma especie, mientras que en el caso del *Pinus pinaster* se observa el efecto contrario, menor concentración de monóxido de carbono en la combustión de pellets que en la de astillas. Además se observa que tanto en la combustión de astillas como en la de pellets, las emisiones de CO y NO_x del *Pinus pinaster* son, en general, inferiores o similares (en el caso de NO_x y pellets) a las del *Pinus halepensis*.

La concentración de compuestos orgánicos totales (COT) sigue una tendencia similar al CO.

En las figuras 8a y 8b se muestra la evolución temporal de las emisiones gaseosas, la temperatura de los humos y caudal de aire para las dos muestras de pellets ensayadas una vez que se han alcanzado las condiciones de equilibrio hasta el final del ensayo.

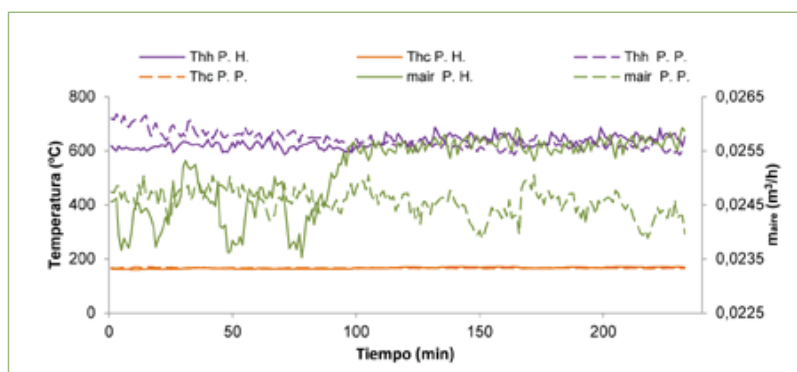


Figura 8a. Evolución temporal de las temperaturas de humos y caudal de aire durante el ensayo de combustión de pellets de *Pinus halepensis* (P.H.) y de *Pinus pinaster* (P.P.).

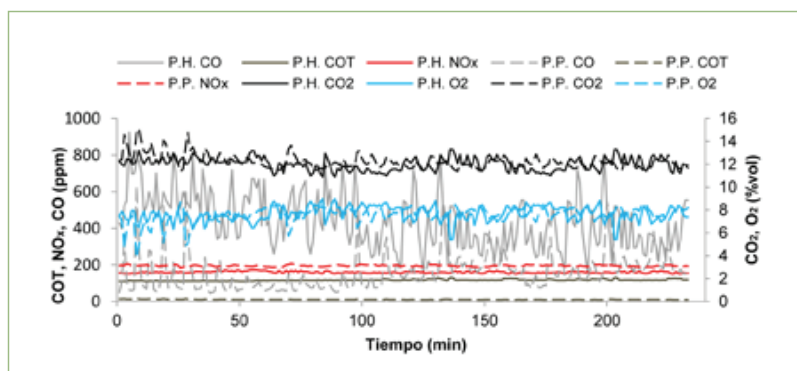


Figura 8b. Evolución temporal de emisiones gaseosas durante el ensayo de combustión de pellets de *Pinus halepensis* (P.H.) y *Pinus pinaster* (P.P.).

Las discontinuidades en las medidas son debidas a que los pellets se alimentan de forma discontinua. En la alimentación en discontinuo, la composición del combustible está continuamente variando a medida que progresa la combustión. En el caso de la combustión de astillas se observaron discontinuidades de las medidas similares.

Los valores de eficiencia y calor generado se han obtenido a partir de los datos mostrados en las tablas 6 y 7 según la norma EN14785 y la EN 303-5. Los resultados se muestran en la tabla 8, junto con las pérdidas de calor q_a , q_b y q_r .

	EN14785				EN 303-5			
	qa (%)	qb (%)	qr (%)	η (%)	P (kW)	Q (kW)	Qb (kW)	η (%)
Pellet <i>P. halepensis</i>	10,33	0,26	0,03	89,38	44,01	49,24	41,39	84,06
Pellet <i>P. pinaster</i>	9,89	0,09	0,59	89,43	41,55	46,46	40,29	86,72
Astillas <i>P. halepensis</i>	9,39	0,17	0,25	90,19	46,95	52,06	46,59	89,50
Astillas <i>P. pinaster</i>	10,69	0,17	0,31	88,84	42,41	47,74	41,79	87,53

Tabla 8. Eficiencia y pérdidas de calor según las normas EN14785 y en 303-5

Se ha observado que:

1. Tanto en la combustión de astillas como en la de pellets de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster* se ha obtenido un rendimiento superior al mínimo requerido por las normas EN 14785 y 303-5 para este tipo de calderas, siendo este mínimo del 75 %.
2. Según la EN 14785 se han obtenido rendimientos similares en el caso de la combustión de astillas y pellets de las dos especies de pino.
3. Según la EN 303-5 la combustión de pellets de ambas especies han dado lugar a rendimientos menores que en el caso de astillas.
4. Tanto para la combustión de astillas como de pellets, las pérdidas de calor q_a son superiores a q_b .
5. Para el *Pinus halepensis* las pérdidas debidas a inquemados en los humos, $q_{b'}$, son superiores en la combustión de pellet ya que las emisiones de CO han sido mayores. En el caso del *Pinus pinaster* se observa lo contrario, es decir, una menor $q_{b'}$ en la combustión de pellets.
6. Las pérdidas debidas a los constituyentes combustibles de los residuos, q_r , han sido inferiores en la combustión de pellets de *Pinus halepensis* que en la de astillas. Esto es debido a que la especie de pino recibida en 2013 para realizar la combustión de pellets tenía un contenido en cenizas inferior a las utilizadas en los ensayos de astillas, lo que genera una menor cantidad de residuo sólido y una mejor combustión del mismo. Para la especie de *Pinus pinaster*, y debido a que el contenido en cenizas de la muestra recibida para la combustión de pellets tenía mayor contenido en cenizas, el resultado ha sido el contrario.

7.2 RESIDUO SÓLIDO GENERADO

Después de cada ensayo, el residuo sólido generado ha sido recogido en el hogar, en el cenicero situado debajo de la parrilla (cenicero 1) y en el cenicero situado bajo el intercambiador (cenicero 2). El residuo sólido se ha analizado para cuantificar la cantidad de ceniza y material inquemado tras el ensayo, lo que nos permite calcular q_r , es decir, las pérdidas de calor debidas al residuo generado según la EN-14785. Cuanto mayor sea la fracción de inquemados mayores pérdidas de calor q_r se obtendrán.

En cuanto a los residuos generados en los ensayos, es importante mencionar que al igual que en los ensayos con astillas de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster* no se han observado sinterizados en la parrilla. En la figura 9 se muestra la distribución del residuo sólido, cenizas e inquemados, en tres partes diferentes de la caldera.

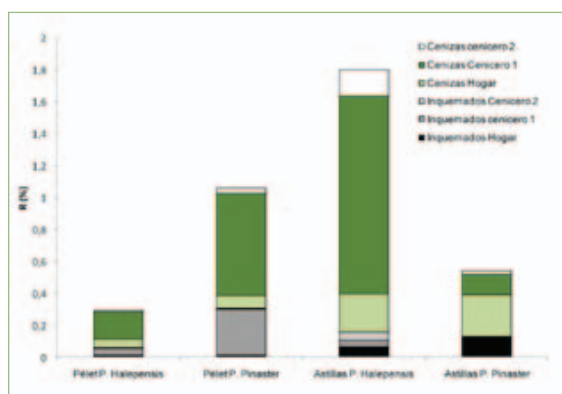


Figura 9. Distribución del residuo sólido en la caldera

Debido a que los pellets de *Pinus halepensis* tienen un contenido en cenizas inferior a las astillas, el residuo generado en la combustión con respecto a la biomasa total alimentada (R) es menor en el caso de los pellets. En el caso del *Pinus pinaster*, debido a que las astillas tienen un contenido inferior en cenizas, el residuo generado en su combustión es menor que en la de los pellets.

El porcentaje de inquemados sobre la biomasa total utilizada es inferior en la combustión de pellets de *Pinus halepensis* que en la de astillas, dando lugar a menores pérdidas de qr y mejorando por tanto el rendimiento de la combustión. En la combustión de pellets de *Pinus pinaster* este porcentaje ha sido mayor.

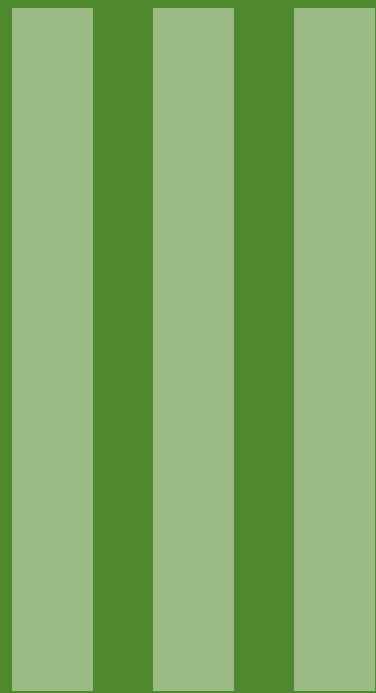
Tanto en la combustión de pellets como en la combustión de astillas se observa que una importante cantidad de cenizas permanecen en el hogar en vez de pasar al cenicero. En la combustión del *Pinus halepensis* el porcentaje que permanece en el hogar es similar en pellets y astillas, mientras que en el *Pinus pinaster* en la combustión de astillas el porcentaje de cenizas que quedan en el hogar es mayor.

Para las dos especies de pino, tanto en la combustión de pellets como de astillas, la mayor parte de las cenizas son recogidas en el cenicero 1. Tan solo las partículas más finas son arrastradas por los humos de combustión y pasan por el intercambiador de calor hacia la chimenea.

8. CONCLUSIONES DE LA COMBUSTIÓN

- Una vez optimizada las condiciones de combustión para las dos especies de Pino, *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, la combustión en forma de astillas o en forma de pellets tiene un comportamiento similar ya que, a pesar de las ligeras variaciones observadas, el proceso de ha tenido lugar con un rendimiento similar (e incluso mayor en el caso de astillas) y con una concentración de emisiones gaseosas por debajo de los límites permitidos. Por tanto, tan solo en el caso de problemas con la logística/almacenamiento de astillas (debido a su baja densidad) o por falta de homogeneidad de la materia prima, será recomendable la utilización de pellets frente a las astillas debido al coste de fabricación de los mismos.
- Se ha observado una importante disminución del residuo sólido generado (respecto a la biomasa total alimentada) en la combustión de pellets de *Pinus halepensis* frente a astillas. A pesar de esto, y aunque en el caso del pellet de *Pinus pinaster* el residuo sólido generado ha sido superior al de las astillas, el rendimiento de la combustión del pellet ha sido superior. Por tanto, esto unido a la menor emisión de CO, COT y NOx indica que, en el caso de pelletizar, el *Pinus pinaster* es más apropiado.
- Una ventaja adicional asociada al empleo de pellets de *Pinus pinaster* es que, al contrario que en el caso de emplear astillas, la mayor parte de los inquemados sólidos y las cenizas se alojan en el cenicero, y, por tanto, no interfieren significativamente en el proceso de combustión y su eliminación resulta más sencilla.
- El utilizar astillas o pellets de una misma especie implica cambiar determinados parámetros en las calderas que permitan que la combustión tenga lugar con el mayor rendimiento y la mínima concentración de emisiones gaseosas. Estos parámetros son la frecuencia de alimentación de biomasa (en torno a cuatro veces superior en el caso de las astillas) y el caudal de aire que permita ajustar el exceso necesario.

Anexo



Secado forzado de
astillas forestales

ANEXO III SECADO FORZADO DE ASTILLAS FORESTALES

1. INTRODUCCIÓN

De cara a la utilización de la biomasa como fuente de energía, valores de humedad del 10% al 20% base húmeda (en adelante b.h.) resultan muy convenientes. Así, valores mayores de humedad en el biocombustible pueden conllevar ciertas desventajas, como son:

- Aumentan los costes de extracción, manejo y transporte, al suponer un aumento de peso y volumen que no aporta valor energético.
- Aumentan los problemas de almacenamiento ya que se favorece la formación de microorganismos y la degradación del material.
- Dificultan la transformación en combustibles procesados como los pellets o briquetas.
- Causan inestabilidad del proceso termoquímico y disminuyen su rendimiento puesto que parte del calor es absorbido en la evaporación del agua, disminuyendo la temperatura de gases y del reactor. Se obtienen buenos rendimientos de transformación con humedades de hasta el 30 % b.h. y el límite de aprovechamiento se suele encontrar en el 60 % b.h. de humedad.
- Incrementan la contaminación como consecuencia de procesos de conversión ineficientes, produciendo inquemados (como el monóxido de carbono o los compuestos orgánicos volátiles) que aumentan los problemas de contaminación ambiental.

Los árboles recién talados tienen contenidos en humedad alrededor del 50 % b.h. y, por tanto, los biocombustibles sólidos de origen forestal (astillas, tronzas, árboles enteros) suelen tener contenidos altos de humedad en origen. Por tanto, es necesario someter el combustible a un secado que puede realizarse de manera natural, o bien de manera forzada, con sistemas de secado industriales. Generalmente se recurre en primer lugar a un secado natural y, si es necesario, se procede a un secado forzado.

El secado natural consiste en dejar que el material pierda humedad hacia el ambiente que le rodea. Necesita que las condiciones climáticas sean medianamente favorables: humedad relativa baja, escasez de lluvias y calentamiento solar. En el secado natural es posible reducir la humedad en pilas de residuos de biomasa forestal hasta un rango del 30 al 20 % b.h. aproximadamente, si bien, en ambiente mediterráneo y épocas estivales se pueden conseguir humedades por debajo del 20 % b.h. Las astillas se agrupan en pilas que suelen ser alargadas, con sección transversal cónica o trapezoidal, y de altura generalmente inferior a 5 m. En el caso de material empacado, troncos o árboles enteros, se amontonan formando bloques de varias alturas.

En cuanto al secado forzado consiste en la reducción de la humedad del residuo mediante algún dispositivo que facilite la circulación de aire en el material a secar o que aporte energía al material, suministrada normalmente en forma de calor, o ambas cosas. Tanto si es necesario un aporte de energía al material como si no, el secado forzado supone un gasto energético y económico durante la operación del secadero y en la instalación del mismo. Así, la evaluación de los beneficios y costes (energéticos y económicos) son los que determinan la idoneidad de la instalación de un posible secadero.

A la hora de plantear la necesidad de un secado forzado se debe tener en cuenta que las grandes centrales de biomasa forestal son más tolerantes que las pequeñas en cuanto al contenido en humedad del material y a su variabilidad a lo largo del tiempo. Centrales eléctricas de tamaño medio o grande funcionan bien con combustibles con un 30 % b.h. de humedad y por tanto no suelen incorporar sistemas de secado forzado.

2. SECADO FORZADO

2.1 GENERALIDADES

El secado forzado sin aporte de calor consiste en forzar la circulación de aire a través del combustible, es decir, ventilar el combustible por medio de equipos mecánicos.

Los secaderos forzados con aporte de calor más utilizados se clasifican, según el método de transferencia de calor, en:

- Secaderos directos: la transferencia de calor se realiza por contacto directo entre gases calientes (convección) y el material húmedo. Los gases calientes se pueden obtener por la combustión de un combustible secundario, de la propia combustión de parte del combustible una vez seco, calentando el gas a utilizar con energía solar térmica (en este caso el gas caliente es aire) o calentando el gas con algún otro método. Sistemas típicos son los secaderos de tambor rotativo, de transporte neumático, de túnel y de lecho fluidizado.
- Secaderos indirectos: la transferencia de calor se realiza a través de una pared (conducción). El vapor liberado del combustible se separa independientemente del medio de calentamiento, y casi siempre se utiliza un pequeño caudal de gases de barrido para facilitar la eliminación del vapor y evitar la saturación y condensación. Sistemas típicos son los secaderos de tambor rotativo con haces tubulares, de bandejas, de discos y de paletas

También pueden utilizarse equipos que utilicen otros métodos de transferencia de calor o activación energética:

- Radiación: el calor es transmitido por fuentes alejadas. Por ejemplo fuentes de radiación infrarroja [1]
- Corrientes de alta frecuencia: Es el secado dieléctrico

Existen incluso combinaciones de distintos tipos de transferencia de calor, no quedando entonces definidos estrictamente en ninguno de los detallados.

En función de la dirección del flujo térmico respecto al flujo de sólido se distinguen tres tipos de secaderos:

- Secaderos de corrientes paralelas unidireccionales. El flujo del gas y de sólidos discurre en el mismo sentido de forma que el gas más húmedo se encuentra con el material más seco.
- Secaderos a contracorriente. El flujo del gas y de sólidos discurre en sentido contrario. De esta manera el sólido más seco se encuentra con un gas también más seco y a mayor temperatura, con lo que la deshidratación es más eficaz y constante. Sin embargo, se trata de sistemas que presentan más riesgos de incendios. Las temperaturas de entrada de gases suelen estar entre los 200 y 500 °C y los de salida entre los 90 y 120 °C (para evitar condensaciones y pérdidas de calor en la chimenea) [2].
- Secaderos de flujo transversal. El flujo de gas atraviesa el sólido a secar de forma transversal a la dirección de movimiento del sólido.

En ocasiones se utilizan combinaciones de los distintos tipos de corrientes.

Los secaderos directos son los más utilizados para el secado de madera [1] y en concreto los de tipo tambor rotatorio y de banda son los más empleados para el secado de astillas [3]. En las industrias de fabricación de pellets, y para pellets de calidad, se utilizan más los secaderos de bandas, ya que los de tambor rotativo suelen utilizar gases de combustión que incrementan ligeramente el contenido en cenizas del producto final. Estos secaderos son grandes consumidores de energía, y su instalación es compleja y tiene costes de explotación muy importantes [3]. Los datos obtenidos por fabricantes de secaderos térmicos convencionales (de tambor y de banda) indican que para rebajar la humedad de la biomasa entre 30 y 40 puntos porcentuales (base húmeda), el consumo de energía en porcentaje del poder calorífico superior (PCS) de la biomasa empleada se sitúa entre el 15 y el 20% [3].

2.2 SECADO FORZADO

2.2.1 Secaderos sin aporte de calor

En estos secaderos, el secado forzado, se consigue colocando rejillas en el suelo en el que descansan las astillas e impulsando aire a temperatura ambiente a través las mismas. En invierno, la capacidad de secado de este método es baja, y no tiene sentido utilizar la ventilación forzada cuando la humedad relativa del aire es alta [4].

Para este proceso de secado, y con el fin de optimizar el uso de la energía de los ventiladores y el resultado final del secado, se recomiendan unos parámetros de construcción de las pilas de astillas y, de volumen y velocidad de aire soplado [4]:

- Las pilas deben construirse con superficies planas.
- La altura óptima de las pilas se puede estimar en 1 m.
- La circulación del aire se fijará entre 180 y 540 m³/h por metro cuadrado de suelo ocupado por la pila o, expresado en volumen, al menos 40 m³/h por m³ de madera maciza. Con el fin de acelerar el proceso de secado, este valor puede aumentarse hasta 150.
- En ningún caso la velocidad del aire debe ser superior a 0,4 m/s para evitar el arrastre de partículas.

2.2.2 Secaderos directos

2.2.2.1 Generalidades

Las características generales de estos secaderos son las siguientes [5]:

- El aporte de energía es por convección. Existe un contacto directo entre el sólido a secar y los gases que calientan el sólido y transportan el agua retirada
- La eficacia energética requiere temperaturas de gases elevadas y, teniendo en cuenta el elevado contenido en materia orgánica del combustible, existen riesgos de combustión por lo que debe realizarse una maniobra cuidadosa.
- Si las temperaturas de los gases son inferiores al punto de ebullición, el contenido en vapor del gas influye en la velocidad de secado y en la humedad final de sólido. Por el contrario, con temperaturas superiores a la de ebullición, el contenido en vapor del gas tiene un efecto muy pequeño en la velocidad de secado y en la humedad final.
- Si el secado requiere realizarse a temperaturas relativamente bajas puede ser necesario realizar una deshumidificación del aire de secado.

- Se necesita manejar caudales de gases importantes. Por tanto, si el producto a secar tiene partículas pequeñas el equipo de recuperación de polvos puede ser muy grande.

2.2.2.2 De tambor rotativo o trommel

Adecuado para biomasa muy húmeda y/o de granulometría gruesa. Los secaderos de tambor rotatorio consisten en un cilindro o trommel que gira sobre unos cojinetes y que mantiene una ligera inclinación con respecto al plano horizontal. El material a secar va avanzando paulatinamente a lo largo del tambor movido por la inclinación y el giro, a la vez que reduce su humedad. Dependiendo de si el recorrido lo realizan los sólidos una sola vez, dos (ida y vuelta) o en zig-zag se clasifican en secaderos de paso simple, doble paso o triple paso.

Son capaces de procesar grandes cantidades de biomasa por hora (desde unos cientos de kilogramos hasta cientos de toneladas hora). Dado que se manejan grandes caudales de gases en los equipos periféricos, suelen ser instalaciones que requieren una gran superficie de implantación.

2.2.2.3 De transporte neumático

Adecuado para materiales con tamaño de partícula < 5 mm, no pegajosos ni porosos o con tendencia a aglomerarse. No se trata por tanto de secaderos adecuados para astillas forestales cuyos tamaños son muy superiores a 5 mm. Los secaderos de transporte neumático arrastran el sólido a secar en una corriente de aire o gases calientes mientras se va evaporando el exceso de humedad que posee. Requiere tamaños de partícula de material pequeños (menores de cinco milímetros) para que la transmisión de calor o de materia sea casi instantánea.

Las ventajas de este sistema son que requieren poca superficie de planta y pueden instalarse al aire libre. Además sus costes de mantenimiento son bajos ya que no tienen apenas partes móviles y la inversión requerida suele ser baja en comparación con otros secaderos.

2.2.2.4 De túnel

Los sólidos se colocan en bandejas, carretillas o cintas de forma que se desplazan progresivamente a través del túnel donde están en contacto con los gases calientes. El funcionamiento puede ser continuo o discontinuo, cuando es continuo se habla de secaderos de banda.

La circulación del aire puede ser de corriente paralela, a contracorriente, una combinación de ambas e incluso transversal. Cuando la biomasa consiste en sólidos granulados, que no ofrecen una resistencia importante al paso del aire, se utilizan transportadores de banda perforada. El producto a secar se reparte sobre una banda sinfín horizontal y los gases calientes atraviesan la banda en flujo vertical, con lo que se mejoran las velocidades de transferencia de calor y masa. Este tipo de secaderos es apropiado para pequeñas capacidades de secado, dado que las superficies requeridas son muy importantes. Sin embargo, como ya se ha comentado en el punto 2.1, son los más utilizados en el secado de material de entrada en plantas de pelletizado cuando se fabrican pellets de alta calidad.

2.2.2.5 De lecho fluidizado

Poco utilizados en general y para astillas en particular. El combustible se seca en un lecho fluidizado. El aporte de calor en realidad es tanto directo con el aire que fluidiza y seca el combustible como indirecto por calor aportado por secciones intermedias de calefacción.

La ventaja de estos secaderos es que requiere niveles de temperatura bajos y se obtiene un producto uniforme en cuanto al secado.

2.2.3 Secaderos indirectos

2.2.3.1 Generalidades

Las características generales de estos secaderos son las siguientes [5]:

- El aporte de energía es por conducción. El material a secar está en contacto con superficies calientes.
- Las temperaturas de las superficies metálicas pueden alcanzar valores de hasta unos 500 °C.
- Para extraer el agua evaporada se utiliza un pequeño caudal de gases de barrido. Esto hace que la recuperación de polvos sea más fácil que en los secaderos directos.
- Los secaderos que utilizan vapor para calentar las superficies de contacto con el sólido regulan más fácilmente el suministro de calor en función de la demanda del material que se está secando.

2.2.2.2 De tambor rotatorio con haces tubulares

Adecuados para productos que presentan un tiempo de secado de velocidad decreciente y que sea prolongado. Apropriados para productos termosensibles y desaconsejados para productos que forman una costra adherente. Se desaconsejan también para grandes cantidades.

Estos secaderos disponen de unas tubos por los que circula vapor de agua o agua caliente y que suelen estar colocados de forma simétrica en una, dos o tres hileras concéntricas dentro del trommel.

2.2.2.3 De bandejas

Adecuados cuando el ciclo de secado es largo o cuando la cantidad de material no justifica la inversión en un equipo continuo más caro. Están constituidos por una doble cubierta cilíndrica vertical, equipada con un eje axial con bandejas fijas horizontales. El fluido caloportador de calor suele ser aceite térmico o vapor y circula por el interior de las bandejas.

Este tipo de secaderos tiene grandes necesidades de mano de obra para la carga y descarga de las bandejas.

2.2.2.4 De disco

Consisten en un estator cilíndrico horizontal de doble pared y un rotor tubular a lo largo del cual están fijados unos discos huecos. El fluido caloportador circula por el interior de los discos del rotor y la doble pared del estator. Hay una serie de palas y contrapalas dispuestas sobre los discos y el estator, que aseguran el avance del producto durante el secado.

2.2.2.5 De paletas

Secaderos constituidos por una carcasa de doble pared en la que están dispuestos dos árboles equipados con paletas que giran en sentidos opuestos. El fluido térmico puede ser vapor a baja presión o aceite térmico y circula por la doble pared de la carcasa, los árboles y las paletas.

El intercambio térmico entre el producto a secar y el fluido caloportador es óptimo al existir un muy buen contacto entre el material húmedo y las superficies calientes. Este buen contacto se consigue con las funciones de mezclado y amasado generadas por la lenta rotación de los árboles y la disposición de las paletas.

2.3 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA AL ELEGIR EL SECADERO

2.3.1. El contenido en agua de la madera

La madera verde contiene agua de tres formas:

- líquida llenando total o parcialmente los lúmenes celulares,
- en forma de vapor de agua llenando los espacios vacíos de los lúmenes celulares,
- y en forma higroscópica ligada al interior de la pared celular

A las dos primeras se les denomina agua “libre” y a la que se encuentra en el interior de la pared celular agua “ligada”.

El proceso de secado se inicia con la evaporación de agua “libre”. Cuando no hay presencia de agua “libre” y las paredes celulares se encuentran completamente saturadas de agua, la madera se encuentra en su punto de saturación de la fibra (PSF) [1]. El PSF aceptado como valor medio común para todas las maderas es del 23,1% b.h. (30% b.s.) [1].

Cuando la madera seca o verde es expuesta a las condiciones atmosféricas, ésta gana o pierde humedad hasta llegar a un punto de equilibrio con la atmósfera. El contenido de humedad de equilibrio se llama humedad de equilibrio higroscópico (HEH) y es siempre inferior o igual al PSF.

El valor de HEH es, aproximadamente, proporcional a la humedad relativa del medio y, para unas condiciones ambientales dadas, puede variar, en cierta medida, en función de [6]:

- la especie
- componentes de la pared celular y los extractivos presentes
- presencia de anomalías en la madera
- temperatura del medio
- histéresis y fatiga higroscópica

Por tanto, si el combustible debe almacenarse después del secado no tiene sentido secar por debajo del HEH. En España los valores máximos anuales del HEH oscilan, según las distintas provincias, entre el 10,7 y el 16,7 % b.h. y los valores mínimos anuales entre el 6,5 y el 13,0 % b.h. [1]

Respecto al ritmo de secado es importante saber que conforme disminuye la humedad del producto obtenido, más difícil y caro es el proceso de secado [2]. Esta afirmación se puede comprobar en la Figura 1, en la que se muestra un resultado teórico general, y en la Figura 2, en la que se muestra un estudio experimental. La Figura 1 muestra una curva de secado general para una madera muy húmeda secada en condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire constantes. Se observan tres fases de secado características:

- Primera fase o de evaporación superficial. En ella el ritmo es constante y elevado, análogo al de la evaporación desde una superficie libre
- Segunda fase o de evaporación interna. Se caracteriza por presentar un ritmo de secado decreciente, como consecuencia de una contribución creciente de la difusión en la zona existente entre el frente interno de evaporación y la superficie externa de la madera

- Tercera fase o de difusión. En la que el ritmo de secado es decreciente y decrece mucho más rápidamente que en la segunda fase.

Se comprueba así como a partir de ciertos valores de humedad el secado es cada vez más costoso, debiendo decidir en qué punto se finaliza el proceso de forma que se alcance una humedad adecuada con un coste económico aceptable.

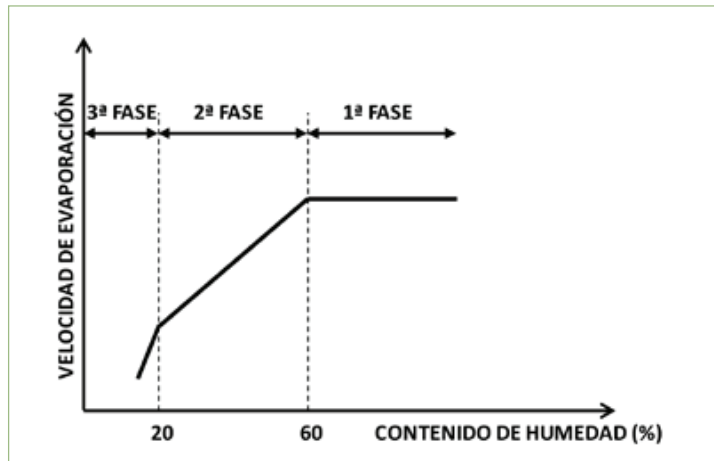


Figura 1. Velocidad de secado en función del contenido en humedad [1]. Datos de humedad en base seca

La Figura 2 muestra los resultados de un estudio experimental de desecado en estufa de astillas de pino de ramas gruesas. Como se observa en la figura, a partir de un determinado valor de humedad el ritmo de desecado decrece de forma importante. Se observa también que cuanto mayor es la temperatura de secado más drástico es el descenso de humedad, siendo muy rápido para las isotermas de 60 y 105 °C.

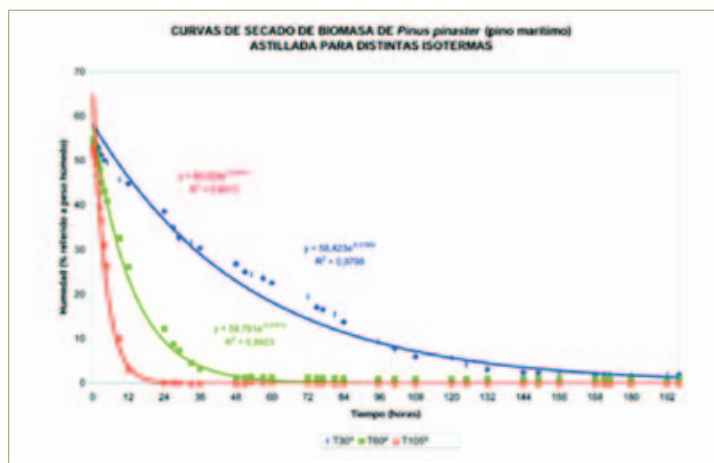


Figura 2. Curvas de secado en estufa a distintas temperaturas (30, 60 y 105 °C). Astillas de ramas gruesas de pino (2.5 a 6 cm de diámetro) [2]

Los resultados del estudio muestran como partiendo de material verde, alrededor de un 55 % b.h. de humedad, y con una temperatura de 105 °C se consiguen humedades del 10 % b.h. en menos de 12 h. Según los autores del estudio experimental mostrado en la Figura 2, los tiempos de deshidratación obtenidos pueden tomarse como referencia en el caso de hacer un tratamiento industrial de secado mediante la formación de mantas de no más de 7 cm de altura y bajo techumbre [2].

2.3.2 Otros factores a considerar

A la hora de elegir el secadero se deben tener en cuenta otros factores como [5]:

- Propiedades del material a secar: características físicas en seco y en mojado (p.e. tamaño de partícula, inflamabilidad, corrosividad, toxicidad, abrasividad)
- Características de desecación: tipo de humedad, humedad inicial y final, temperatura permisible máxima
- Cualidades del producto: contaminación, contracción, uniformidad de la humedad final
- Forma de circulación del material: operación continua o por lotes, tipo de proceso anterior y posterior al secado, caudal másico que se va a secar
- Características de la ubicación: espacio disponible, tipo de combustible, temperatura, humedad y limpieza del aire, recuperación o no de polvos y disolventes, salida de gases, ruido, vibraciones.

2.4 EJEMPLOS DE SECADEROS DE ASTILLAS EXISTENTES EN EL MERCADO

2.4.1 Introducción

Se presentan en este apartado varios equipos de secado que se consideran interesantes. Se ha intentado cubrir las distintas tecnologías existentes, sin embargo en el mercado se pueden encontrar más productos y fabricantes. Se destaca también que algunos fabricantes que se relacionan disponen de otros productos de secado que no se presentan en este documento. Durante la búsqueda de equipos en el mercado se ha comprobado que son los secaderos de tipo directo los que fundamentalmente se utilizan en el secado de astillas.

2.4.2 Secaderos de tambor rotativo

Existen gran cantidad de equipos de este tipo en el mercado. A continuación se presenta un equipo con triple paso y flujo inverso (Figura 3). Se trata de un secadero directo de tambor rotativo que usa gases de combustión para el secado y que tiene 8 zonas de secado en el interior del tambor (de forma que se aumenta la exposición del material al gas caliente).



Figura 3. Imagen de secadero de tambor rotativo ECPI modelo Z8 [7]

2.4.3. Secaderos de banda

2.4.3.1 SWISS COMBI secadero de banda tipo KUVO

Se trata de un secadero directo de banda con circulación transversal del gas caliente, que fluye a través del combustible y la banda. El secado se produce a baja temperatura disminuyendo los riesgos de incendio.

En algunos sistemas se instalan dos cintas. Por la cinta inferior circula el material más húmedo y por la superior se recircula el material de salida de la inferior, que ya está más seco (Figuras 4 y 5). Se consigue así reducir el espacio del equipo y optimizar el secado. La planta ajusta automáticamente los parámetros de secado.

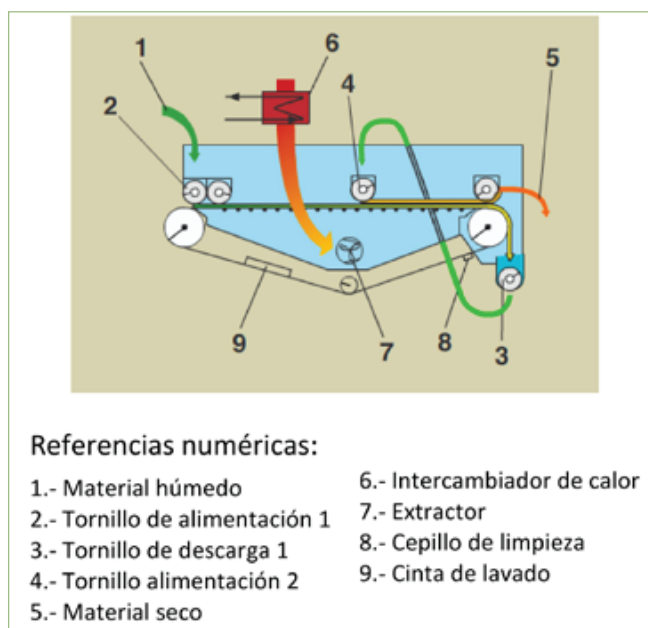


Figura 4. Esquema de secadero de banda marca SIWSS COMBI tipo KUVO [8]



Figura 5. Imagen de una instalación real de secadero de banda marca SIWSS COMBI tipo KUVO en la empresa PFEIFER en Austria [8]

Nota: La imagen está tomada sin la cobertura que recubriría todo el secadero

2.4.3.2 Secadero de banda de baja temperatura de la compañía STELA

Se trata de un secadero directo de banda con circulación transversal de aire caliente, que fluye a través del combustible y la banda. El secado se produce a baja temperatura (60 a 100 °C) disminuyendo los riesgos de incendio y produciendo un secado suave y homogéneo. El calor se transmite al aire a través de un intercambiador de calor (Figura 7).

El material húmedo se introduce de forma continua en la banda y con unos husillos se homogeniza y distribuye sobre la misma. La altura del material se ajusta en función de las condiciones del mismo. La cantidad de aire necesario se ajusta a lo largo de la banda de forma que es menor a la salida, cuando el producto está más seco. El aire atraviesa el combustible de arriba hacia abajo y de esta forma la misma banda hace de filtro de partículas del aire de salida. Para optimizar más el secado, se sitúa un volteador a la mitad del recorrido, que mezcla el producto a secar igualando la capa superior más seca y la inferior más húmeda, consiguiéndose así un producto de salida más homogéneo. La velocidad de avance de la banda se ajusta automáticamente en función de la humedad del material.



Figura 6. Imagen de secadero de banda de baja temperatura de la compañía STELA [9]



Figura 7. Esquema de secadero de banda de baja temperatura de la compañía STELA [9]

2.4.4. Secadero compacto Ökodry de la compañía FLIEGL

Se trata de un sistema de secado directo compacto con flujo de gas transversal que se integra en un contenedor (Figura 8). Al llenar el contenedor, que puede ser de un volumen aproximado de 30 m³, se va alimentando el sistema de secado con un sistema hidráulico de palas de empuje de forma estable y casi sin mantenimiento. El aire caliente, movido por un ventilador externo, fluye a través de una lámina perforada en el suelo, donde seca el material. Finalmente las astillas limpias salen con un tornillo sinfín, y las impurezas y los finos salen por otro tornillo [10].

Cabe destacar que se necesitarían 24 horas para secar a un 10-15% de humedad 30 m³ de astillas de madera recién extraídas del monte, con un contenido de humedad inicial del 45% [10].



Figura 8. Imagen de secadero compacto de la compañía FLIEGL [11]

2.4.5 Secadero vertical de la compañía SAIMATEC

Se trata de un secadero directo en el que el gas de secado es aire. La temperatura del aire de secado es baja, normalmente por debajo de los 150 °C. La característica más significativa es que se trata de un equipo vertical, en el que el material se mueve por gravedad en el interior del secadero (Figura 9). Este tipo de construcción supone un ahorro de espacio. Además, otra característica que indican los fabricantes, y que resulta positiva en el secado de astillas, es que admite partículas gruesas.



Figura 9. Imagen de secadero vertical de la compañía SAIMATEC [12]

2.4.6 Secadero solar

El secadero que se describe a continuación está construido y optimizado en el centro de investigación en el que se ha desarrollado y patentado y, de momento, no lo comercializa ninguna empresa.

La Figura 10 muestra el esquema de un secadero solar especialmente concebido para el secado de biomasa lignocelulósica astillada o molida y que ha sido patentando por un equipo de investigadores del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Se trata de un sistema que utiliza energía solar térmica pasiva y activa, apoyado además por otros sistemas de aporte de calor (p. ej. caldera o calor residual de proceso), ya que con la energía solar no se consigue el 100% de la energía necesaria para una producción estable a lo largo del año [3]. Así, la ventaja que presenta este sistema se obtiene durante la operación del mismo, ya que utiliza principalmente energía solar, es decir una energía renovable y “gratuita”. Los costes de instalación no se analizan en el presente trabajo, pero incluyen la construcción del secadero, la instalación de colectores solares térmicos (calientan aire para introducirlo en el secadero) y de otros sistemas de obtención de energía no solares como por ejemplo una caldera de biomasa o de un sistema de aprovechamiento de calor residual de algún proceso.

La Figura 10 detalla los componentes y esquematiza el funcionamiento del sistema, en el que el aporte de calor para el secado se consigue de cuatro formas distintas [3]:

- mediante la radiación solar incidente a través de la superficie acristalada del invernadero,
- mediante el aporte del suelo radiante alimentado con agua caliente procedente de una caldera o de un intercambiador de calor residual. La superficie radiante cubre todo el suelo del canal de secado,

- mediante el calentamiento gracias a los paneles colectores solares diseñados para este fin y colocados en las cubiertas del silo de entrada y del almacén de salida, y que introducen aire caliente en el secadero
- mediante el calentamiento del aire exterior que entra al invernadero a través de un intercambiador de calor residual o una caldera de agua caliente

El secadero utiliza métodos de sedado directo (se introduce aire caliente, convección), indirecto (utilización del suelo radiante, conducción) y de radiación solar. Las necesidades de aporte de calor de las distintas fuentes se controlan de forma automática con una serie de dispositivos que miden la humedad relativa y temperatura del aire en distintos puntos del secadero y, midiendo en continuo la humedad del material a secar mediante un dispositivo situado en un volteador en contacto con el material (Figura 10).

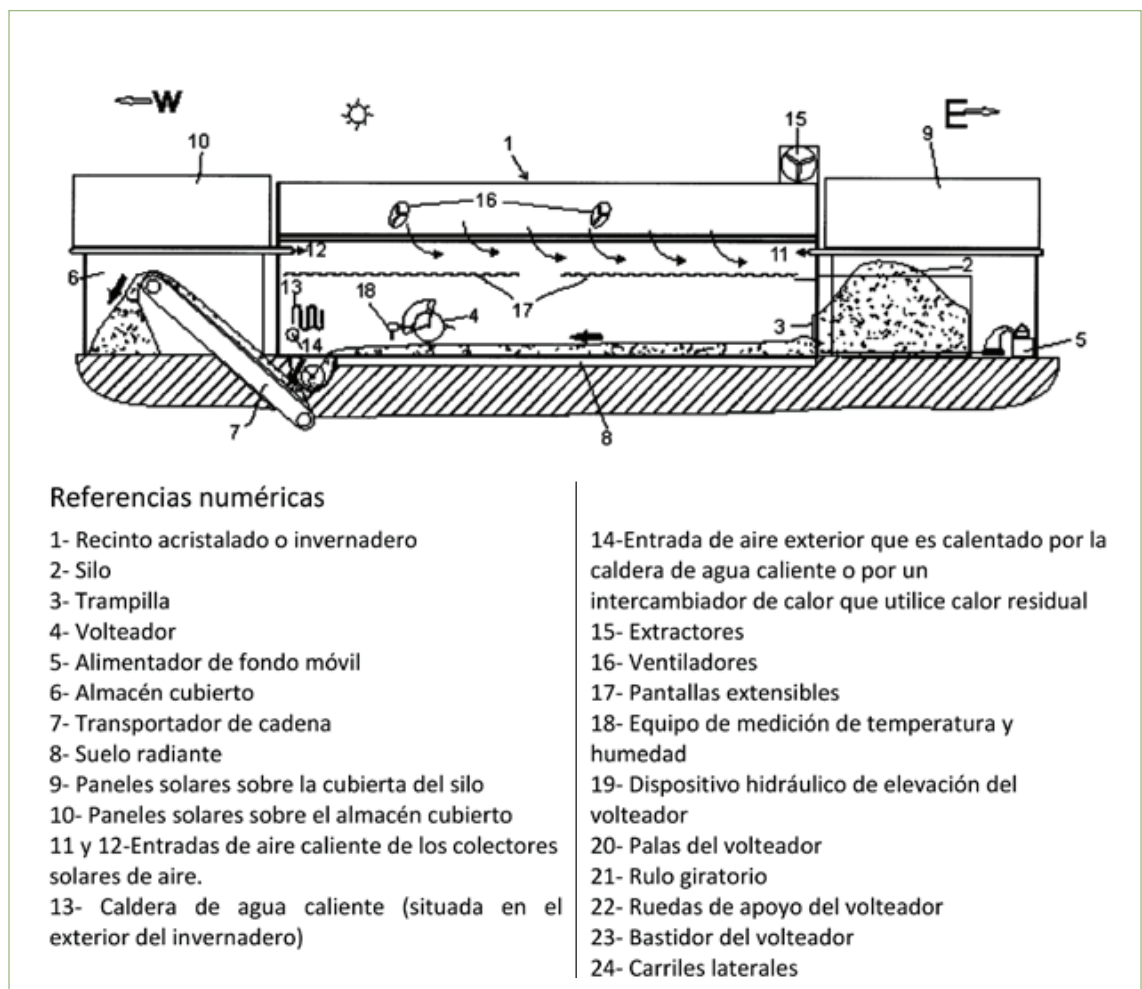


Figura 10. Esquema de secadero solar [3]

3. CONCLUSIONES

Se enumeran a continuación las conclusiones más relevantes.

- Con el secado natural se pueden conseguir humedades de hasta el 30-20 % b.h. e incluso por debajo del 20 % en ambientes mediterráneos y periodos estivales.
- Se puede mejorar el secado natural con un secado forzado sin aporte de calor ventilando el material mediante sopladores de aire en el suelo sobre el que descansa la pila.
- Los secaderos forzados más utilizados para astillas forestales son de secado directo y en concreto los de tambor rotatorio (trommel) o de banda. Los de trommel son más adecuados para procesar grandes cantidades, sin embargo suelen usar gases de escape de calderas y, por tanto, para la obtención de pellets de calidad se usan secaderos de banda.
- El secado forzado supone un coste que puede evaluarse en términos de gasto en energía del combustible empleado. Así, los secaderos convencionales de tambor o banda utilizan de un 15 a un 20% del poder calorífico superior de la biomasa empleada para rebajar la humedad entre 30 y 40 puntos porcentuales (base húmeda). Así, por ejemplo, asumiendo una central de generación eléctrica de biomasa de 10 MW y una humedad inicial de la biomasa del 40%, el consumo de combustible requerido para producir esa potencia estaría en torno 120 kTon/año si la biomasa no se seca (asumiendo un PCS de 19,5 MJ/kg en base seca) y alrededor de 80 kTon/año si la biomasa se introduce con un 10% de humedad. Para obtener dicha cantidad de biomasa al 10%, y teniendo en cuenta el consumo energético del secado, sería necesario adquirir 141 kTon/año de biomasa al 40% de humedad. Si se supone un precio de 45 €/Ton para la astilla de pino con un 40% de humedad, el coste anual asociado al incremento de consumo sería de 945 k€.
- Se debe establecer la humedad final que se desea conseguir teniendo en cuenta que conforme disminuye la humedad del producto obtenido, más difícil y caro es el proceso de secado.
- Si después del secado el combustible va a ser almacenado no tiene sentido secar por debajo de la humedad de equilibrio higroscópico (HEH).
- Los secaderos de transporte neumático son adecuados para serrín pero no para astillas, ya que requieren tamaños de partículas menores o iguales a 5 mm.
- Existen opciones que se adaptan a las distintas necesidades de la planta de aprovechamiento: secaderos verticales, o con recirculación del material para ocupar menos espacio, secaderos compactos, secaderos solares que suponen un ahorro energético al utilizar la energía solar. Así mismo, en todo tipo de secaderos se realizan distintos ajustes para adecuarlos a las condiciones del proceso industrial.

REFERENCIAS

- [1] Alvarez H., Fernández-Golfín J.I. Fundamentos teóricos del secado de la madera. Colección monografías INIA, nº 82.
- [2] Ortíz L., Tejada A., Vázquez A., Piñero G. Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la Cadena monte-industria. Parte III: Producción de elementos densificados. Revista CIS-Madera.
- [3] Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Secadero solar para el secado de biomasa. Esteban L.S., Martín M., Bados R., Escalada R. ES 2 379 932 B1. 18 febrero 2013.
http://www.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/37/99/ES-2379932_B1.pdf
- [4] Technical backgrounds for advanced techniques and technologies in biomass production. (Ed.) Poinsett E. Supported by: Intelligent Energy – Europe (IEE). (Chapter XI). 2012
<http://www.biomassstradecentre2.eu/wood-biomass-production/technical-backgrounds/>
- [5] Sala J.M., López L.M. Plantas de valorización energética de la biomasa. Editorial OCHOA. I.S.B.N.: 84-7359-545-91.
- [6] López I.; Codina M. Estudio de las características de la astilla forestal y buenas prácticas para su aplicación energética Proyecto INTRADER (2008 – 2010) Estudio E002. 2010.
http://www.ctfc.es/infobio/docs/Estudio_pilas_astilla_buenas_practicas_INTADER_CTFC.pdf
- [7] <http://ecpissystems.com/dehydration/> Visitado en julio de 2013.
- [8] <http://www.swisscombi.ch/en/produkte/kuvo/> Visitado en julio de 2013.
- [9] http://www.stela.de/es/newsflash_home_mitte/secadora-de-banda-contin%C3%BAa-a-baja-temperatura-para_fzv0yiuc.html Visitado en julio de 2013.
- [10] <http://www.expobioenergia.com/es/noticias/sistema-compacto-potente-y-eficiente-para-secado-astillas-madera> Visitado en julio de 2013.
- [11] <http://www.fliegl-dosierttechnik.de/english/158/2616> Visitado en julio de 2013.
- [12] <http://www.saimatec.fi/index.php?pid=31&lg=en> Visitado en julio de 2013.



Edición: IBERDROLA
Diseño y Maquetación: IBERDROLA
Fotografía: IBERDROLA
ISBN-10: 84-934989-7-1
ISBN-13: 978-84-934989-7-9
Año de Publicación: 2014



IBERDROLA