

MÁSTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER:

Valorización de la biomasa en Castilla y León
a través de turnos de rotación cortos

Ángela Rodríguez Rubio



Universidad de Valladolid



ÍNDICE

1	Introducción	5
2	Objetivos	7
3	Antecedentes.....	9
3.1	Experiencias de obtención de bioenergía a nivel internacional	19
3.2	Experiencias y modelos de crecimiento y producción aplicables a las plantaciones de chopo en Castilla y León	22
3.3	Estudios aplicables a la caracterización económica de plantaciones de chopo en Castilla y León.....	27
4	Metodología.....	29
4.1	Revisión y análisis de datos de estudios previos	29
4.2	Comparación de la productividad media anual	39
5	Resultados y discusión	41
6	Conclusiones.....	51
7	Bibliografía	53





1. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos globales a los que nos enfrentamos en el siglo XXI es el cambio climático y para hacerle frente se hace necesario una profunda transformación de los modelos energéticos y productivos actuales.

Este modelo energético actual conlleva una alta dependencia de los combustibles fósiles lo cual genera graves problemas económicos y medioambientales. Todo ello da lugar a una revisión de las políticas energéticas, estableciéndose nuevos objetivos para disminuir las emisiones de gases causantes del cambio climático mediante la transformación de nuestro modelo energético.

Además, como consecuencia del alto precio de la energía, el calentamiento global y una creciente conciencia ambiental, existe hoy en día un gran interés en reducir la dependencia de los combustibles fósiles, sustituyéndolos por fuentes de energía más renovables a corto plazo.

En este sentido la biomasa forestal se presenta como una de las opciones con mayor potencial de desarrollo como materia prima para obtención de energía, ya que su empleo como fuente de energía libera la misma cantidad de CO₂ que la absorbida por la planta durante su desarrollo además de conllevar la movilización de una serie de materias primas, que hasta ahora se han considerado residuos y que en un futuro próximo pueden ser valiosos recursos.

El Plan de Energías Renovables 2011-2020 contempla nuevos escenarios energéticos y la incorporación de objetivos en consonancia con la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Esta Directiva establece como objetivo conseguir una cuota mínima del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea, el mismo objetivo establecido para España, y una cuota mínima del 10% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía en el sector del transporte en cada Estado miembro para el año 2020.

Además este Plan refleja que el potencial de biomasa primaria en verde disponible en España, bajo hipótesis conservadoras, se sitúa en torno a 88 millones de toneladas, incluyendo restos de masas forestales existentes, restos agrícolas, masas existentes sin explotar y cultivos energéticos a implantar.



La biomasa forestal constituye por tanto un recurso que puede resultar competitivo en el mercado de las energías renovables, sin embargo su aprovechamiento se ve condicionado por varios factores:

- Existencia de mercados competidores
- Baja densidad energética
- Altos costes de obtención de materia prima
- Necesidad de integrar procesos forestales
- Seguridad y continuidad del abastecimiento

Para enfrentar estos obstáculos, la gestión forestal debe incorporar una planificación energética y en esta línea es necesario considerar los cultivos energéticos, empleando especies de crecimiento rápido a través de cultivos intensivos con altas densidades de plantación y turnos muy cortos.

No obstante, para que la biomasa lignocelulósica constituya una fuente rentable de materias primas debe considerarse su aprovechamiento completo. Es por ello que surge el concepto de biorrefinería como instalación que integra procesos de conversión de biomasa en combustible, energía y productos químicos.

En esta línea, el grupo de investigación de materiales lignocelulósicos del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNASE) lleva años estudiando las características de la lignina, a fin de encontrar métodos que permitan degradarla abaratando los costes y realizando experiencias con híbridos de chopo manipulados genéticamente con una lignina más fácil de degradar.

Asimismo, el desarrollo de estudios que mejoren la precisión a la hora de cuantificar la biomasa resulta decisivo para valorar las posibilidades de nuestros montes y las oportunidades de desarrollo de la industria en torno a la biomasa forestal.

La producción de biomasa lignocelulósica ha sido empleada por el hombre desde la antigüedad, mediante corta y regeneración de diversas especies. Actualmente se consideran cultivos forestales en corta rotación aquellos en los que se aplica un manejo intensivo empleando especies de crecimiento rápido.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar, mediante el empleo de modelos de crecimiento existentes, la productividad de uno de los cultivos leñosos con mayores expectativas para la producción de energía en Castilla y León, las plantaciones de *Populus x euramericana I-214* en alta densidad y turnos cortos, valorando su viabilidad y atractivo económico mediante herramientas financieras, frente al uso del mismo cultivo para su uso en la industria maderera.



2. OBJETIVOS

- Revisar los modelos de crecimiento y producción aplicables a las plantaciones de chopo en Castilla y León.
- Caracterizar, en términos de producción, *Populus euramericana I-214* según el turno de corta.
- Comparar, desde el punto de vista económico, los cultivos energéticos en turnos cortos de *Populus euramericana I-214* frente a los cultivos con fines industriales convencionales del mismo clon en Castilla y León.





3. ANTECEDENTES

El género *Populus*, con gran presencia en el Hemisferio Norte, engloba cerca de 40 especies de crecimiento rápido, de fácil propagación vegetativa y con aptitud para la hibridación interespecífica.

El chopo (*Populus spp.*) es un árbol esbelto de porte cilíndrico que alcanza hasta 30 metros de altura. Es una especie con gran capacidad de adaptación a un amplio rango de condiciones climáticas y edáficas y de carácter colonizador con gran facilidad de reproducción, lo cual ha facilitado la obtención de clones que permiten un manejo sencillo de las plantaciones a la vez que dotan de homogeneidad a las mismas.

El cultivo de chopo en España se ubica en tierras bajas, cercanas a cursos de agua, asociado a explotaciones agrícolas y terrenos de ribera. Cabe distinguir las masas naturales compuestas por especies autóctonas como *Populus alba*, *Populus nigra* y *Populus tremula*, de las plantaciones dedicadas exclusivamente a producción maderera, formada por clones híbridos de *Populus sp.*

Estas plantaciones intensivas de chopo son una importante fuente suministradora de materia prima para las industrias madereras españolas. Esto se debe a la superficie que ocupan, 136.000 hectáreas según datos de 2013 del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y a la alta productividad, que oscila en torno a los 12 m³/ha/año (Hernanz, 2001).

Además, la madera de chopo es lisa y ligera, con buena aptitud para desarrollo, por lo cual las plantaciones en turno largo se destinan frecuentemente a esta industria, en la que el destino final depende de su diámetro [Figura 1].

Otro uso frecuente es para obtención de pasta de celulosa, sin embargo uno de los mayores problemas que se presentan actualmente en las fábricas de celulosa y papel es el aprovechamiento posterior de sus subproductos.

Paralelamente la especie presenta un alto rendimiento energético (2750 KJ/Kg) y los ratios de fotosíntesis del chopo son muy elevados, con una gran capacidad de crecimiento frente al resto de especies europeas, por lo que su capacidad para fijar CO₂ atmosférico convierten a esta especie en una importante herramienta en la lucha contra el cambio climático, pudiendo reciclar anualmente 15 toneladas de CO₂ por hectárea.

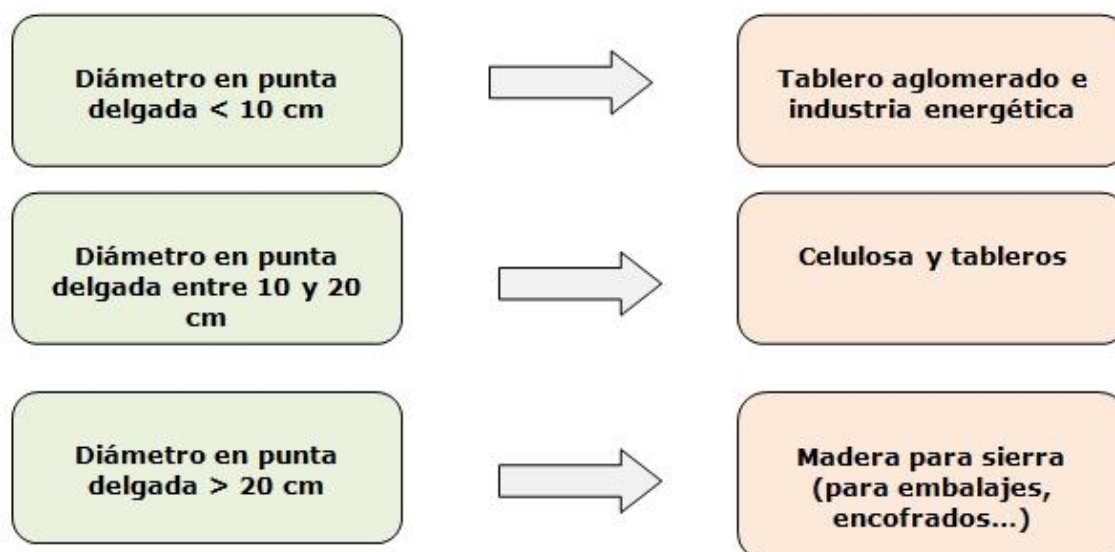


Figura 1.-Destino de la madera de chopo en función del diámetro en punta delgada. (Fuente: Elaboración propia)

En España se distinguen tres zonas productoras de chopo, en función del tipo de suelo, clima y método de cultivo:

- Zona del Duero: donde el sistema de plantación es a raíz profunda, con un turno de corta aproximado de 15 años.
- Zona del Valle del Ebro y Cataluña: con un sistema de plantación a raíz superficial con riego y un turno de corta aproximado de 12 años.
- Zona de Granada y Valle del Genil: plantaciones con riego y un turno de corta de entre 8 y 10 años.

En Castilla y León el chopo es un cultivo autóctono de la zona, con buena adaptación al terreno, además las choperas actúan como filtros verdes y suelen emplazarse en zonas llanas y con fácil accesibilidad lo cual facilita las labores de implantación, mantenimiento y el aprovechamiento.

Este cultivo ocupa 83.659 hectáreas en la Comunidad, según datos de los inventarios realizados por la Administración Pública, siendo León la provincia que mayor superficie destina a este cultivo.

Esta superficie constituye un 12,5% de la total europea, y su producción asciende a 0,5 millones de m³/año, el 10% de la europea.



Tabla 1.- Superficie de cultivo de chopo por provincias en Castilla y León. (*Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013*).

PROVINCIA	SUPERFICIE (ha)
ÁVILA	1.280
BURGOS	9.532
LEÓN	38.069
PALENCIA	8.235
SALAMANCA	1.055
SEGOVIA	7.854
SORIA	8.159
VALLADOLID	3.495
ZAMORA	5.980
TOTAL	83.659

Los datos ofrecidos por la Comisión Nacional del Chopo (organo dependiente del MAGRAMA) reflejan que el principal clon utilizado en España para la producción de madera en rollo es *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214", un híbrido entre *Populus deltoides* y *Populus nigra*, plantado a raíz profunda con un marco de plantación de entre 4x4 y 6x6 metros y un turno de aprovechamiento de entre 12 y 20 años.

Este híbrido es un árbol hembra, muy vigoroso, con elevada plasticidad y un crecimiento extremadamente rápido y constituye uno de los clones con mayor estabilidad productiva de los habitualmente empleados en cultivos forestales para energía en España (Cañellas et al., 2012).

Fue obtenido en Italia por Piccarolo y su equipo de investigación en el Instituto de Casale Monferrato y su uso se extendió ampliamente tras la 2ª Guerra Mundial.

En líneas generales, los clones de chopo considerados como materiales base de reproducción del género *Populus* sp. son los establecidos en el primer Catálogo Nacional según Orden de 24 de junio de 1992 y posteriormente ampliados según Orden APA/544/2003 de 6 de marzo.



La inclusión de estos clones en el Catálogo se ha realizado considerando su adaptación en algunas regiones de España, sin embargo no todos los clones inscritos son adecuados a las características de todas las regiones españolas.

El empleo del clon I-214 se justifica en su alta plasticidad a los distintos tipos de terreno y condiciones climáticas de la Cuenca del Duero, constituyendo estas choperas hasta el 70% de las existentes en Castilla y León.

En cambio, cuando dado el carácter ripario del chopo, el objetivo sea la restauración de riberas y de otros espacios degradados, se desaconseja el empleo de clones y se opta por buscar una mayor diversidad genética recurriendo a masas naturales de *Populus alba*, *Populus tremula* y *Populus nigra* como fuentes de los materiales de reproducción.

Sin embargo, gran parte del éxito del cultivo con especies e híbridos del género *Populus* se basa no solo en su aptitud para el crecimiento rápido, si no también en la versatilidad de su madera, entre las que se encuentra la posibilidad de su uso energético.

En esta línea el chopo aventaja a otras especies en cuanto al aprovechamiento de su biomasa lignocelulósica al alcanzar elevadas producciones en tiempos relativamente cortos. Para ello se utilizan además de clones de chopos incluidos en el Catálogo Nacional, importaciones de otros clones expresamente seleccionados.

Su manejo para este fin difiere de la gestión tradicional de choperas, ya que se pretende obtener la mayor cantidad de biomasa por unidad de tiempo y superficie, empleando para ello reducidos turnos de corta y alta densidad de las plantaciones.

La plantación se realiza habitualmente por medio de estaquilla o brotes de cepa con una densidad que puede superar las 10.000 plantas/ha.

Se consideran turnos de corta inferiores a 5 años, pudiendo aprovechar sucesivos rebrotes y obteniendo varios ciclos de aprovechamiento antes de iniciar un nuevo ciclo de producción plantando de nuevo.

Este tipo de cultivos presenta una gran importancia de cara al futuro, como fuente de materia energética y fijador de CO₂, además de contribuir al desarrollo rural sostenible, generando puestos de trabajo y permitiendo la planificación en la obtención del recurso, proporcionando alternativas al abandono de cultivos tradicionales.

Para la obtención de biomasa energética, los cultivos leñosos se llevan a cabo bajo un sistema de manejo intensivo a altas densidades en turnos cortos (5-10 años) o muy cortos (< 5 años).

Estos cultivos energéticos, también conocidos por sus siglas en inglés "SRF" (Short Rotation Forestry), son adecuados para especies de crecimiento rápido como chopos, sauces, eucaliptos, paulonias, ailantos etc.



Concretamente en Europa, las especies más empleadas para cultivos energéticos forestales creciendo en sistemas de alta densidad con rotación de cultivo son principalmente *Salix sp.*, *Populus sp.*, *Eucaliptus sp.* y *Robinia pseudoacacia*, mientras que el empleo de otras especies como *Paulownia sp.*, *Platanus sp.* o *Ulmus pumila* se encuentra en fase experimental.

Las densidades de plantación son elevadas y el cultivo puede llevarse a cabo como fustes individuales o múltiples, tras realizar el primer recepe ("Short Rotation Coppice", SRC).

Como ya se ha indicado, el género *Populus sp.* presenta una gran predisposición para ser considerado en este tipo de cultivos. Entre las características que lo hacen susceptible de ser empleado con esta finalidad se encuentran (Sixto Blanco H. et al. 2010):

- Facilidad para el establecimiento de la plantación.
- Oferta abundante de material genético mejorado.
- Especie de crecimiento rápido con elevadas producciones potenciales.
- Producción de un rebrote vigoroso tras la corta.
- Balances energéticos positivos.
- Baja necesidad de agroquímicos en comparación con cultivos agrícolas.
- Posibilidad de otros usos medioambientales complementarios (filtros verdes, diversificación del paisaje agrícola, etc.)

En líneas generales las aplicaciones finales de la biomasa de chopo incluyen la producción de biocombustibles sólidos con fines térmicos y la producción de etanol mediante la aplicación de procesos de hidrólisis o gasificación del material lignocelulósico.

Pero como paso previo al aprovechamiento energético de la biomasa resulta de interés conocer la caracterización química de la madera de la especie, ya que su composición aporta datos relevantes para definir el comportamiento energético de la biomasa en procesos químicos y termoquímicos, incidiendo en el poder calorífico y en la composición de las cenizas y de los gases producidos en la combustión lo cual condiciona a su vez la obtención de productos.



Así, el valor del poder calorífico de la madera del clon I-214, obtenido de forma experimental tras el ensayo con más de 30 probetas en la E.T.S. de Ingenieros de Montes de Madrid es de 4.618 kcal/kg, mientras que el valor esperado, obtenido de manera teórica según la composición química del clon I-214, sería de 4.521,5 kcal/kg. (Marcos Martín F. et al., 2007).

Tabla 2.- Composición química elemental de la biomasa de chopo I-214 con corteza. (Marcos Martín F. et al, 2004).

Elemento	%
Carbono	49,200
Hidrógeno	6,300
Nitrógeno	0,330
Oxígeno	44,130
Azufre	0,020
Cloro	0,015
TOTAL	99,995

Tabla 3.- Contenido en elementos químicos de duramen y albura. (Marcos Martín F. et al, 2004).

	Albura (ppm)	Duramen (ppm)
Cenizas	680	4267
Potasio	300	4267
Calcio	44	64
Magnesio	23	101
Sodio	36	15

Los elementos químicos están organizados a su vez en moléculas biológicas como celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos. En la madera de chopo la celulosa ronda el 40%, la hemicelulosa el 20% y la lignina comprende el 22% del peso en seco de la madera. El resto de los componentes de la madera se engloban en lo que se conoce como extractivos y en la madera de chopo constituyen el 18%.

Los compuestos más interesantes para la industria son la celulosa y la hemicelulosa, que son necesarios para la fabricación de pasta de papel y biocombustibles, entre otros productos.

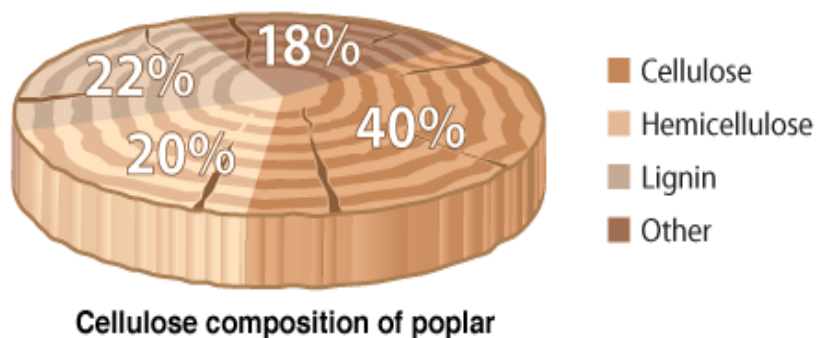


Figura 2.- Composición de la madera de chopo (Fuente: <http://hardwoodbiofuels.org>)

De la celulosa se obtienen azúcares que pueden ser posteriormente convertidos a combustibles o diversos productos químicos. A partir de la hemicelulosa y la lignina se pueden obtener distintos combustibles, productos químicos, polímeros y otros materiales. Finalmente los residuos de celulosa, hemicelulosa y lignina se pueden utilizar para cogeneración.

Sin embargo, para fabricar cualquiera de estos productos es necesario degradar previamente la lignina, ya que constituye una sustancia cementante que une los carbohidratos formando una especie de conglomerado.

Este proceso de degradación de la lignina requiere gran cantidad de energía y reactivos químicos, lo que resulta muy costoso económicamente.

Teniendo en cuenta por tanto la heterogeneidad de la madera y las diferentes posibilidades de conversión existentes para la obtención de variedad de productos permiten desarrollar múltiples esquemas de conversión en una biorrefinería.

Estas biorrefinerías de material lignocelulósico permiten por tanto la valorización de los componentes de la biomasa lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina) mediante procesos termoquímicos y bioquímicos, poniendo asimismo en valor materiales considerados de desecho a priori.

Entre estos materiales se encuentran astillas y serrines provenientes de las industrias de transformación de madera de chopo, junto con biomasa procedente de estos cultivos energéticos o astillado in situ de restos de tratamientos selvícolas.

En la siguiente figura, elaborada a partir de la revisión bibliográfica realizada, se ha tratado de realizar una aproximación a los productos que se pueden obtener a partir de la madera de chopo, pretendiendo un aprovechamiento integral de la misma:

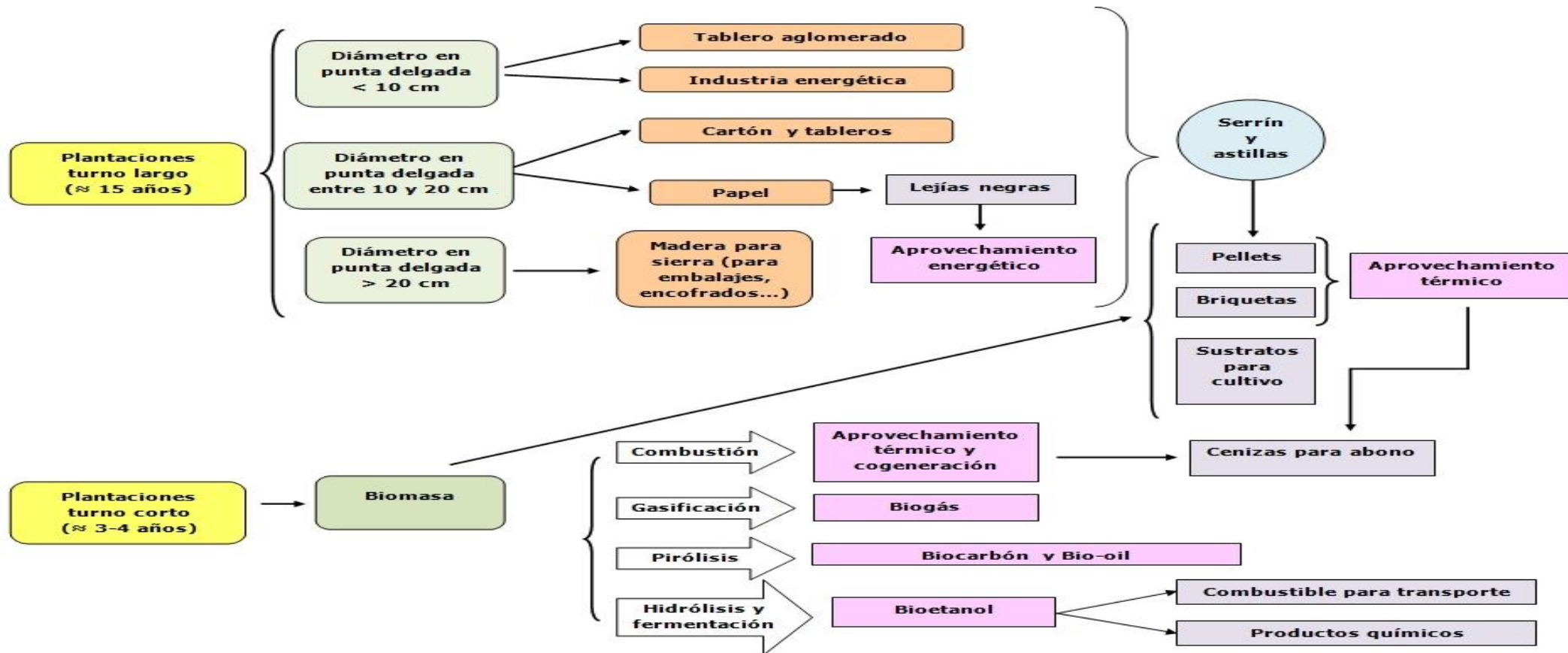


Figura 3.- Aprovechamiento integral de la madera de chopo (Fuente: Elaboración propia)



A su vez, la composición química de las cenizas de chopo da una idea de la potencialidad de este residuo para su uso como abono orgánico. Las cenizas de chopo presentan contenidos importantes de diferentes nutrientes como K, P, Mg y Ca lo cual demuestra su potencial como fertilizante.

Tabla 4.- Composición química de las cenizas de chopo. (Rueda J., 1997).

Compuesto	%
K ₂ O	49,2
Na ₂ O ₃	1,6
CaO	23,7
MgO	13,7
Fe ₂ O ₃	1,1
P ₂ O ₅	4,1
SO ₃	3,1
SO ₂	2,0
Mn ₂ O ₃	1,4

Asimismo, las cenizas devolverían al sistema buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal, revalorizando un residuo y contribuyendo a la idea de balance neutro de carbono otorgado al aprovechamiento energético de la biomasa.

Cabe resaltar que el grado de fertilidad de un suelo condiciona de manera importante la producción de biomasa.

En relación al chopo se consideran suelos de fertilidad aceptable aquellos con una relación N:P:K de 5, 30 y 100 ppm respectivamente (Domínguez, 1997) y en términos generales, su cultivo requiere, para conseguir producciones relevantes, de suelos fértiles y de elevados aportes de agua en nuestras latitudes

Sin embargo, en la revisión bibliográfica realizada existe controversia sobre la conveniencia de fertilizar o no los cultivos energéticos de chopo. Entre otros, estudios desarrollados por Heilman y Xie (1994) sobre plantaciones de varios clones de chopo, no obtuvieron diferencias significativas tras la aplicación de distintas dosis de fertilizantes. Aunque es de preveer que esta falta de respuesta pudiera deberse a un adecuado grado de fertilidad del suelo previo a la plantación.



Por el contrario, otras experiencias reportan respuestas positivas, incidiendo en los beneficios que aporta la fertilización al aumento de productividad de la plantación.

Entre ellas, las investigaciones de Coleman et al. (2006) en Minnesota, constataron un aumento de la productividad, de manera generalizada, en distintos lugares de ensayo en plantaciones experimentales de varios clones de chopo. El aumento de productividad osciló entre el 43 y el 82% tras 3 aplicaciones anuales de un abono complejo.

Por otro lado, junto a la fertilización tradicional hay que valorar los estudios realizados sobre la posibilidad de fertilizar a través del empleo de aguas y lodos residuales, habiéndose obtenido en muchos casos resultados positivos en la mejora de la productividad de las plantaciones.

Es el caso de los estudios desarrollados por Labrecque et al. (1995) sobre plantaciones forestales de especies de uso energético, observándose incrementos en altura y diámetro basal de entre 70 y 140 %.

Otros estudios inciden en la necesidad de seleccionar adecuadamente la ubicación de las plantaciones para minimizar los costes de fertilización, para ello una opción factible sería instalar cultivos energéticos en antiguos vertederos (Nixon, 2001).

Estas opciones, además de contribuir a la gestión de residuos y a la recuperación de áreas degradadas, pueden resultar de interés a la hora de optimizar el coste de la fertilización, en tanto que la fertilización tradicional conlleva un coste energético que debe ser valorado, tanto desde el punto de vista financiero como medioambiental.



3.1. Experiencias de obtención de bioenergía a nivel internacional

A nivel global actualmente se emplean frecuentemente especies de chopo (*Populus* sp.) y de sauce (*Salix* sp.) para la obtención de bioenergía a partir de biomasa leñosa en turno corto.

Las primeras referencias en cuanto a la producción de biomasa leñosa en turno corto tuvieron lugar en los años 60 y 70 con estudios sobre plantaciones en rotación corta de *Platanus occidentalis* en Estados Unidos (**Herrick y Brown**, 1967 y **Steinbeck et al.**, 1972).

Herrick y Brown propusieron el empleo de especies de crecimiento rápido en altas densidades de plantación, con turnos mas cortos de los habituales y un alto nivel de mecanización, experiencias que fueron imitadas posteriormente por otros investigadores, centrándose sobre todo en especies del género *Populus* y sus híbridos.

Durante la década de los 70, en el contexto de la primera crisis energética, DeBell sugirió la producción de madera para obtención de energía, comenzando a desarrollarse investigaciones en torno a diferentes especies madereras en Estados Unidos.

Entre ellas, **DeBell** (1985) en su estudio "Mixed plantations of Eucalyptus and Leguminous trees enhance biomass production", compara la producción de biomasa obtenida en plantaciones puras de eucalipto frente a plantaciones mixtas de eucalipto junto con especies de los géneros *Acacia* y *Albizia*, poniendo de relieve la obtención de mayor cantidad de biomasa en las plantaciones mixtas.

Sin embargo, posteriores estudios de este mismo autor se centraron en las plantaciones de chopo a rotación corta en la costa oeste de Estados Unidos, comparando el empleo de distintos clones a diferentes espaciamientos (0,18 y 0,30 m) y obteniendo productividades entre 32 y 35 t/ha de materia seca tras turnos de 5 años.

Por otro lado en las investigaciones desarrolladas por **Heilman** (1994), sobre plantaciones de distintos híbridos de chopo entre 1984 y 1994 y considerando una densidad de 10.000 pies/ha, se obtuvieron producciones de entre 20 y 25 t ms/(ha.año).

Experiencias igualmente desarrolladas en el estado de Washington por **Scarascia-Mugnozza** (1997) empleando *Populus trichocarpa* X *Populus deltoides*, a una densidad de 10.000 pies/ha y considerando ciclos de 4 años, evidenciaron productividades de hasta 35 t/(ha.año).



Estos estudios, aparte de otros desarrollados en zonas próximas, pusieron de manifiesto el alto potencial para obtención de biomasa de clones de *Populus X interamericana* (*Populus trichocarpa X Populus deltoides*) en la costa oeste de Estados Unidos.

Esta alta productividad, según recoge **Scarascia-Mugnozza** (1997), puede explicarse por las condiciones climáticas de esa zona. La considerable duración del periodo libre de heladas en la costa oeste de Estados Unidos permite una mayor amplitud del periodo de crecimiento de las plantaciones de clones de chopo, comparado con la región central de Norteamérica donde puede llegar a duplicarse el número de días de heladas al año.

En Europa **Nixon** (2001) planteo en su estudio "The potential for short rotation energy forestry on restored landfill caps", evaluando cultivos a turnos corto en Inglaterra, la alta relación existente entre la productividad y el tiempo que tarda en alcanzarse la tangencia de copas.

Nixon incidió además en aspectos relevantes para incrementar la producción de biomasa, como son la elección del clon, la localización de la plantación, y la fertilización y gestión de la misma.

Estudios posteriores, como el concluido por **Nassi o Di Nasso** et al (2006) en Pisa (Italia), incide en el potencial del chopo para obtención de biomasa. En su estudio, llevado a cabo desde 1998 a 2006, pone de manifiesto el balance energético positivo de estos cultivos considerando ciclos de 12 años con cosechas cada 3 años, dando como resultado productividades en torno a las 16,4 t/(ha.año).

El interés por estos cultivos se pone también de manifiesto en estudios como el desarrollado en Suecia por investigadores de Universidad de Uppsala. En Suecia se ha empleado durante décadas el sauce para bioenergía, sin embargo estimando la producción de biomasa de distintos clones de chopo estableciendo en parcelas experimentales con diferentes características (tipo de suelo, temperatura, precipitación) plantaciones a diferente densidad inicial y con turnos algo más cortos que en plantaciones convencionales, se comprobó que puede llegar a constituir una importante alternativa de cultivo en tierras agrícolas.

Más recientemente, **Karacic A.** et al (2010), considerando los clones Boelare, Beaupre y OP42, obtuvieron productividades de entre 59 a 98 t/ha en turnos de 9 a 12 años respectivamente.

En la siguiente tabla, elaborada tras una exhaustiva búsqueda bibliográfica, se recogen distintas experiencias desarrolladas a lo largo de los últimos años a nivel internacional, lo cual da una idea de la importancia a nivel global de este tipo de cultivos.

**Tabla 5.-** Distintas productividades documentadas de *Populus* sp. a nivel internacional. (Elaboración propia)

Clon	Localización	Productividad	Referencias	Observaciones
D-01 <i>P. trichocarpa</i> X <i>P. nigra</i>	Estado de Washington, USA	32-35 t/ha	DeBell et al (1993)	Productividad acumulada tras turno de 5 años
H-11 <i>P. trichocarpa</i> X <i>P. deltoides</i>	Estado de Washington, USA	32,1-34,4 t/ha	DeBell et al (1993)	Productividad acumulada tras turno de 5 años
Varios clones de <i>P. trichocarpa</i>	Estado de Washington, USA	20-25 t/(ha.año)	Heilman et al. (1994)	Densidad de 10.000 pies/ha
<i>P. trichocarpa</i> X <i>P. deltoides</i>	Estado de Washington, USA	35 t/(ha.año).	Scarascia-Mugnozza (1997)	Densidad de 10.000 pies/ha, considerando ciclos de 4 años
Clon I-69 Clon de <i>P. deltoides</i>	China	13,1 t/(ha.año)	Fang et al. (1999)	Densidad de 1105 pies/ha, considerando un ciclo de 6 años
Trichobel <i>Populus trichocarpa</i>	Inglaterra	41,71 t/ha	Tubby et al. (2002)	Productividad acumulada tras turno de 3 años
<i>Populus maximowiczii</i> X <i>Populus nigra</i>	Quebec (Canada)	72,20 t/ha	Labrecque M. et al. (2004)	Productividad acumulada tras turno de 4 años. Densidad de 18.000 pies/ha.
Hazendans <i>P. trichocarpa</i> X <i>P. deltoides</i>	Bélgica	45,6 t/ha	Laureysens et al. (2004)	Productividad tras ciclo de corta de 4 años
Clon LUX (<i>P. euramericana</i> X <i>P. robusta</i>)	Pisa, Italia	16,4 t/(ha.año)	Nassi o Di Nasso et al (2006)	Ciclo de 12 años con cosechas cada 3 años
Clon Boelare <i>Populus</i> X <i>interamericana</i>	Suecia	9,2 t/(ha.año)	Karacic (2010)	Turno de 9 años y densidad de 5.000 pies/ha



3.2. Experiencias y modelos de crecimiento y producción aplicables a las plantaciones de chopo en Castilla y León.

Teniendo en cuenta la importancia de la especie e indiferentemente del destino de la plantación, es útil disponer de modelos de crecimiento de *Populus* sp., a fin de poder cuantificar la producción a diferentes edades de la masa y calcular distintas rentabilidades para cada tipo de aprovechamiento.

Sin embargo, los cultivos de chopo a turno corto precisan de mayor investigación, ya que pese a que se conoce relativamente bien su silvicultura a turno largo (turnos de 12 o más años) no existe tanta información sobre la silvicultura a turnos cortos, empleada para el aprovechamiento energético de la especie.

En líneas generales, los modelos existentes para estimar el crecimiento y producción de las masas forestales difieren entre sí en su complejidad y en el detalle con el que describen la masa, considerando diferentes variables.

La mayoría de los distintos trabajos que se han ido desarrollando en España sobre modelos de crecimiento en masas artificiales de *Populus x euramericana* consideran como variable dependiente el volumen, en función del diámetro normal, la edad o alguna otra variable relacionada.

Por otro lado, la elección del tipo de modelo más adecuado depende, fundamentalmente de las aplicaciones previstas y de la localización de la zona de estudio. Así es posible obtener orientación para la gestión forestal de plantaciones de una zona concreta a partir de datos de otras masas de características similares.

En esta línea, y con el fin de buscar aplicación para la gestión de las choperas de la Cuenca del Duero, se llevaron a cabo los estudios desarrollados en 1996 por **Bravo F. et al.**

Entre ellos, el estudio sobre el análisis de modelos de producción para *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero, en el cual se trataba de obtener un modelo de producción aplicable a las masas de *Populus x americana* "I-214" con un marco de plantación de 6 x 6 metros en la Cuenca del Duero. Se consideraron datos calibrados procedentes de parcelas del clon "Campeador", con características de productividad similares y con un marco de plantación de 8 x 5 metros.

Otra publicación de este autor se basó a su vez en la obtención de las curvas de calidad y las tablas de producción de *Populus x euramericana*, obteniendo en primer lugar el área basimétrica por hectárea en diferentes calidades, para obtener posteriormente la producción media estimada y el crecimiento medio anual en dichas calidades.

Esto permite realizar una predicción de crecimientos y producciones que puede ser útil para valorar la rentabilidad económica de las choperas y para planificar las



cortas con el fin de obtener un flujo constante de materia prima, orientando así la gestión de la plantación en la Cuenca del Duero.

Tabla 6.- Producción estimada en m³/ha para masas de *Populus euramericana* en la Cuenca del Duero (Fuente: Bravo F. et al., 1995)

Edad	Volumen (m ³ /ha)			
	Calidad I	Calidad II	Calidad III	Calidad IV
3	3,59	2,53	1,77	1,25
4	14,75	10,37	7,29	5,12
5	34,43	24,22	16,99	11,96
6	60,59	42,61	29,91	21,04
7	90,72	63,81	44,79	21,50
8	122,79	86,37	60,62	42,64
9	155,39	109,29	76,72	53,96
10	187,61	131,95	92,62	65,14
11	218,87	153,94	108,05	75,99
12	248,86	175,04	122,86	86,41
13	277,43	195,13	136,97	96,34
14	304,52	214,18	150,34	105,74
15	330,13	232,19	162,98	114,63

En cuanto a los cultivos energéticos, su interés en España comenzó a finales de los años 70, apareciendo en esta época los primeros ensayos a turno corto con plantaciones de chopo, especie frecuente en muchas zonas del país.

Surgieron así las primeras investigaciones, como la desarrollada por **San Miguel A. y Montoya J.** en 1985 en el INIA, analizando los resultados obtenidos tras 5 años de producción de talleres de chopo a rotación corta.

Los diversos resultados obtenidos tras las investigaciones de San Miguel A. et al. estuvieron orientados a la comparación de espaciamientos, de clones y de turnos.



Tras dichos estudios, se observó, como se muestran en las siguientes tablas, que la cantidad de biomasa se incrementa a medida que aumenta la densidad de plantación, no recomendándose por tanto trabajar con densidades inferiores a 10.000 plantas/ha. Además destaca la alta producción del clon I-214 frente a otros clones estudiados y la conveniencia de considerar rotaciones rápidas:

Tabla 7.- Comparativa de espaciamientos del clon I-214 con un turno de 4 años. (Fuente: San Miguel et al., 1992)

Densidad de plantación	Producción kg ms/(ha . año)	
	Turno 1	Turno 2
10.000	16.932	16.252
5.000	15.817	16.931
3.750	15.142	20.198
2.500	14.661	16.755

Tabla 8.- Comparativa de cuatro clones, plantados a una densidad de 5.000 pies/ha y con un turno de 4 años. (Fuente: San Miguel et al. , 1992)

	Producción absoluta kg ms/(ha . año)	
	Turno 1	Turno 2
I-214	12.392	18.925
Chopa de Granada	10.709	17.317
Campeador	10.043	16.121
Canadá Blanco	8.432	15.426



Tabla 9.- Comparativa de turnos para el clon I-214 con una densidad de plantación de 5.000 pies/ha (*Fuente: San Miguel et al., 1992*)

Turno (años)	Producción en 10 años kg ms/(ha . año)	
	Producción media	Producción acumulada
2	15.179	75.895
3	12.997	43.323
4	15.450	38.625
5	18.882	37.764

Por otro lado, a mediados de los años 80 se inició en Soria un programa de investigación sobre el cultivo de chopo en turno corto, promovido por el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER) dependiente del Departamento de Energías Renovables del CIEMAT.

En el contexto de este programa se desarrollaron varios trabajos, entre ellos la tesis doctoral "Efecto del turno de corta y de la densidad de plantación sobre la productividad de diversos clones de chopo en condiciones de corta rotación" desarrollada por la ingeniera **Pilar Ciria** en 1998.

Esta experiencia se llevó a cabo en cuatro parcelas situadas en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables del CIEMAT en Soria. En este trabajo se realizó un estudio comparativo de la producción de biomasa de diversos clones de chopo en condiciones de corta rotación (3, 4, 5 y 6 años) y alta densidad de plantación (10.000, 5.000, 2.500 y 1.666 plantas/ha), analizando el efecto de estas variables sobre la productividad de los distintos clones. La producción de biomasa media, de los once clones estudiados en las mismas condiciones de edad y densidad fue de 10,30 tms/ha.año.

**Tabla 10.-** Comparativa de producciones medias (kg/pie) para el clon I-214 a distintos turnos y densidades de plantación (*Fuente: Ciria P., 1998*)

Densidad (pies/ha)	Turno			
	3 años	4 años	5 años	6 años
10.000	0,79	1,35	1,66	5,92
5.000	1,78	3,02	3,83	6,03
2.500	1,07	7,19	8,08	10,90
1.666	2,11	8,06	10,37	16,43

Entre 1997 y 2004, **Marcos Martín F. et al** estudiaron una plantación energética experimental del clon I-214 en Cabrerizos (Salamanca), evaluando las principales características energéticas de la biomasa obtenida de un cultivo energético establecido en Cabrerizos (Salamanca).

Realizando una plantación mediante estaquillas del clon, considerando un marco de plantación de 0,33 x 0,9 metros y un turno de corta a la edad de 2, 3 y 4 años, se han estudiado características como la humedad, densidad, composición química, poder calorífico y productividad energética, todos ellos factores clave en el comportamiento energético.

El volumen con corteza de las plántulas se estimó mediante tablas de cubicación específicas para la especie y lugar, obteniéndose una relación entre el volumen y el diámetro normal y la altura. La productividad obtenida superó las 18 t/ha.año.

Tabla 11.- Valores de productividad del clon I-214 considerando distintos turnos (*Fuente: Marcos Martín F. et al, 2004*)

Turno	Productividad t ms/(ha . año)
2 años	18,66
3 años	12,51
4 años	10,14



En **2005**, una tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid, "Análisis de los cultivos de *Populus x euramericana* Dode, clon I-214, a turnos muy cortos con fines energéticos", desarrollada por **Miguel Godino García**, trató de demostrar la viabilidad de dicho clon para la producción de biomasa con fines energéticos en Cabrerizos (Salamanca), mediante plantaciones con densidades superiores a 30.000 pies/ha (marco de plantación de 0,9 x 0,3 m) y turno de corta de dos años.

Más recientemente, entre los años 2005 y 2012 se desarrolló a nivel nacional el Proyecto Singular Estratégico On-Cultivos, con el objetivo de promover la producción de energía en España a partir de la biomasa de cultivos energéticos, entre los cuales tiene un gran protagonismo el chopo.

Este proyecto, en el que colaboraron universidades, empresas y centros de investigación de varias comunidades autónomas, consideró una superficie aproximada de demostración de cultivos de 15.000 ha, abarcando aspectos tanto de demostración de cultivos energéticos, como de logística y transporte, generación de electricidad, análisis del ciclo de vida y difusión de resultados.

3.3. Estudios aplicables a la caracterización económica de plantaciones de chopo en Castilla y León.

La relevancia del chopo en términos de producción en Castilla y León es muy significativa, resultando ser la frondosa con mayor volumen en cortas anuales. Paralelamente, dadas las propias características de la especie y el manejo intensivo de la misma, alcanza altas rentabilidades que pueden llegar a competir con los usos agrícolas del suelo.

Diversos estudios han tratado de analizar tanto la rentabilidad como los turnos económicamente óptimos ligados a este tipo de inversión forestal.

A mediados de los años 90 el chopo se presentaba como una alternativa al abandono de tierras agrícolas. En esta línea surgieron estudios como el desarrollado en 1995 por **Del Peso Taranco C. et al.**, valorando la rentabilidad de las choperas frente al cultivo de regadío en el Valle del Duero. Concretamente compararon la productividad de una chopera tipo de la provincia de Palencia frente a la de una hectárea tipo de cultivo de remolacha en la misma zona.

Se consideró una plantación de chopo a raíz profunda con un marco de 6 x 6 y un turno de 14 años y se determinaron los costes anuales, las subvenciones existentes y la productividad para distintas calidades, a fin de comparar varios VAN posibles.

Como conclusiones obtuvieron que el cultivo de chopo resultaba rentable, siempre que existiera una buena política de ayudas y anticipos de rentas, con el fin de compensar el periodo de falta de rentas derivado de la propia producción forestal.



En 2001, **Díaz Balteiro L. et al.** en su estudio "Caracterización económica de las choperas en Castilla y León" y considerando datos de diversas plantaciones en Castilla y León, determinaron que las plantaciones de chopo a turno largo constituían una alternativa de inversión muy atractiva para los propietarios forestales, incluso en ausencia de ayudas comunitarias.

Además constituyen un aprovechamiento altamente competitivo frente a productos agrarios tradicionales, incluyendo cultivos de regadío, estimando un turno económicamente óptimo en torno a 14 años. La existencia de subvenciones elevaría la rentabilidad, sin embargo sólo suponía el 10% del VAN. Por otro lado establecieron que el turno óptimo es estable frente a posibles variaciones de parámetros como precio de la madera y gastos de forestación.

Por otro lado, la optimización de toda la cadena logística en torno a los cultivos energéticos incidiría en mejorar la viabilidad técnica y financiera de los mismos. En esta línea **Iberdrola** puso en marcha en 2012 el proyecto "Lignocrop" , que cuenta con 60 hectáreas de cultivos energéticos (chopos y robinias) repartidas en varias provincias, entre ellas Valladolid.

Los objetivos son demostrar la viabilidad técnica y económico-financiera de los cultivos energéticos leñosos como alternativa que complementa a los cultivos tradicionales, recuperar la actividad en tierras marginales y comprobar el impacto sobre el empleo y creación de riqueza que se produce en el entorno rural donde se implanta

Finalmente , dado el papel que juegan las plantaciones de chopo como sumideros de CO₂ , se puede considerar que la inclusión en el análisis económico de la captura de CO₂ incrementa en cualquier caso la rentabilidad de la inversión (en términos de TIR y de VAN), proporcionalmente al índice de productividad de la parcela y al precio de la tonelada de CO₂ fijada

Además, la capacidad de fijación de CO₂ del chopo, en torno a 20 t/(ha.año), convierten a esta especie en una buena alternativa cuando uno de los objetivos de la gestión perseguidos sea la captura de carbono atmosférico. (**Rodríguez F. et al.** 2005)



4. METODOLOGÍA

La modelización de la producción en las plantaciones de chopo es fundamental a la hora de fijar los turnos de aprovechamiento óptimos, comparar la producción con la rentabilidad de otros usos alternativos del terreno así como conocer a priori la producción esperada a cada edad, pudiendo entonces planificar las inversiones y el régimen de cortas.

Para la comparación, desde el punto de vista económico, de la productividad obtenida por plantaciones convencionales de *Populus euramericana* I-214 frente a cultivos energéticos del mismo clon, el primer paso es por tanto la selección de los modelos de producción que mejor se ajusten, tanto en localización geográfica como en características de la masa, a dichas plantaciones de Castilla y León.

Así, a partir de modelos de producción será posible cuantificar y predecir las producciones a distintas edades de la masa y calcular sus respectivas rentabilidades, estudiando los balances de gastos e ingresos de las plantaciones.

4.1. Revisión y análisis de datos de estudios previos

Tras la revisión bibliográfica realizada para este trabajo, se han seleccionado los siguientes estudios, en función del destino de la plantación y el consiguiente turno de corta considerado:

Tabla 12.- Estudios base seleccionados

Turno	Estudios considerados	Referencias
15 años	➤ Curvas de calidad y tablas de producción para <i>Populus x euramericana</i> en la Cuenca del Duero	Bravo et al. 1995
4 años	➤ Tallares de chopo I-214 a turnos muy cortos	Marcos Martín F. et al. 2004
	➤ Estudio de la productividad en biomasa de tallares de chopo a turnos muy cortos	Marcos Martín F. et al. 2007

A continuación se analizan los tres estudios seleccionados como base para realizar este trabajo:



➤ **Plantación de *Populus euramericana* I-214 a turno de corta de 15 años**

Como se ha indicado previamente, se ha seleccionado el estudio de Bravo et al. (1995), "Curvas de calidad y tablas de producción para *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero" para analizar este tipo de plantaciones.

Los datos que consideraron en el estudio proceden de los ensayos de cuidados culturales desarrollados por el INIA durante el periodo de años desde 1968 a 1986.

Bravo et al. presentaron en dicho estudio una tabla de producción y unas curvas de calidad que pudieran servir de apoyo, orientando la gestión de la populicultura tradicional de la Cuenca del Duero.

Esta populicultura tradicional, con el objetivo del abastecimiento de materia prima con fines industriales, se basa en el empleo de *Populus x euramericana* Dode (Guinier) "I-214", plantado a raíz profunda a un marco de 6 x 6 metros.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que en estos ensayos se emplearon datos de *Populus x euramericana* Dode (Guinier) "Campeador", con un marco de plantación de 8 x 5 metros (250 pies/ha) y un rango de edades de 3 a 15 años, siendo validado el modelo frente a *Populus x euramericana* Dode (Guinier) "I-214", a un marco de 6 x 6 metros, ya que las diferencias constatadas en cuanto a productividad entre uno y otro clon son mínimas.

El desarrollo de modelos de producción pretende facilitar la predicción de crecimientos y producciones, pudiendo planificar la gestión para obtener un flujo constante de materias primas, además de facilitar la comparación productiva con otros clones, o con distintos marcos de plantación, como es el caso de este trabajo.

Por otro lado, la construcción de tablas de crecimiento y producción de una chopera según las distintas clases de calidad requieren en primer lugar definir y determinar dichas clases.

Concretamente en el estudio de Bravo F. et al se han estimado 4 calidades de estación, en función del área basimétrica a la edad de 10 años, que permitan una clasificación de parcelas a la hora de aplicar el modelo.

Tabla 13.- Valores del área basimétrica (m²/ha) a los 10 años según las distintas calidades de estación. (Fuente: Bravo F. et al. 1995)

Calidad			
I	II	III	IV
20,21	16,77	13,31	9,87



En nuestro caso vamos a considerar una parcela tipo, de calidad media (calidad II) ubicada en la Cuenca del Duero, empleando sus datos de productividad asociados, obtenidos por Bravo F. et al, según las distintas edades de la masa:

Tabla 14.- Producciones estimadas, en m³/ha para masas de *Populus x euramericana* de calidad II en la Cuenca del Duero. (Fuente: Bravo F. et al. 1995)

Calidad II ($\approx 16,77$ m ² /ha)	
Edad (años)	Productividad acumulada (m ³ /ha)
3	2,53
4	10,37
5	24,22
6	42,61
7	63,81
8	86,37
9	109,29
10	131,95
11	153,94
12	175,04
13	195,13
14	214,18
15	232,19

Gráfico de Productividad vs Edad de la plantación

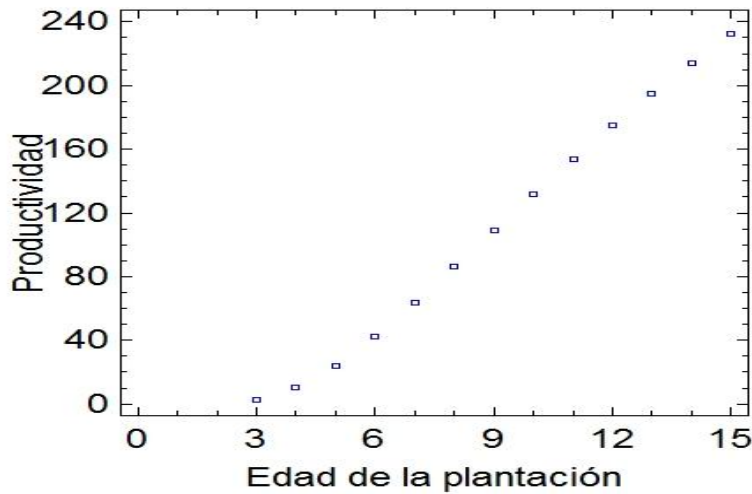


Figura 4.- Representación gráfica del modelo de producción de Bravo F. et al (1995). (Elaboración propia con ayuda del software estadístico Statgraphics).

Tras representar los datos se ha ajustado un modelo lineal para visualizar la relación entre la edad de la masa y la productividad asociada. El coeficiente de determinación $R^2 = 0,997635$ confirma la bondad del ajuste:

Gráfico del Modelo Ajustado

$$\text{Productividad} = -72,2593 + 20,3504 \cdot \text{Edad de la plantación}$$

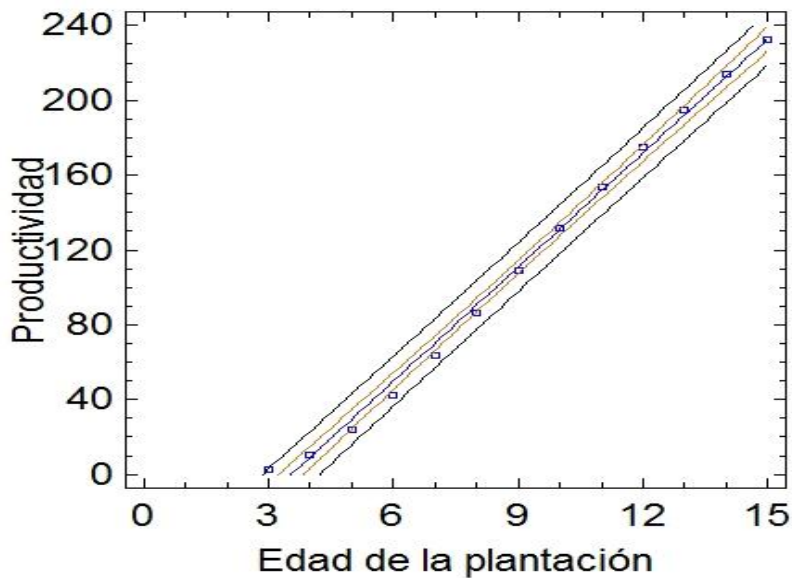


Figura 5.- Ajuste lineal del modelo de producción acumulada de Bravo F. et al (1995). (Elaboración propia con ayuda del software estadístico Statgraphics).



A la edad de la masa de 15 años la productividad total acumulada, según Bravo F. et al., sería de 232,19 m³/ha, por lo tanto, considerando la densidad básica o peso volumétrico saturado de la madera de chopo, podremos obtener la productividad en t/ha.

Se conoce como densidad básica a la relación existente entre la masa de madera seca o anhidra y el volumen en el punto de saturación de la fibra, medida en g/cm³:

$$\text{Peso volumétrico saturado} = P_o/V_h \quad (\text{humedad} > 30\%)$$

Esta relación, para el clon I-214 es de 0,29 g/cm³ (Rueda J., 1997), por tanto la productividad total acumulada tras un turno de 15 años será:

$$232,19 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot 0,29 \text{ t/m}^3 = 67,3351 \text{ t/ha}$$

Obteniéndose una productividad media anual de:

$$67,3351 \text{ (t/ha)}/15 \text{ años} = \mathbf{4,4890 \text{ t/(ha.año)}}$$

➤ **Plantación de *Populus euramericana* I-214 a turno de corta de 4 años**

Para el análisis de los cultivos energéticos de chopo a turno corto y alta densidad se han considerado dos estudios:

- Tallares de chopo I-214 a turnos muy cortos (Marcos Martín F. et al. 2004).

Se estudió una plantación energética experimental de chopo *Populus x euramericana* I-214 ubicada en Cabrerizos (Salamanca).

El marco de plantación considerado fue de 0,3 x 0,9 metros con un turno considerado de 4 años y un recepe posterior de 2 años.

Los estudios realizados se desarrollaron entre los años 1997 y 2004, midiendo diversas variables sobre 250 pies para obtener una tabla de producción.

Cabe indicar que en el año 1 del turno no se realizaron mediciones de productividad, por lo cual el valor de productividad considerado se estimó haciendo la media de los dos primeros años al final del año 2.

Por otro lado, el menor crecimiento durante los años 3 y 4 del turno llevó a no considerar la productividad a partir del 2º año del recepe.

**Tabla 15.-** Producciones anuales estimadas para plantaciones energéticas de *Populus x euramericana* I-214 (Marcos Martín F. et al. 2004).

Edad (años)	Productividad t/(ha.año)	Productividad acumulada t/ha
1	18,66	18,66
2	18,66	37,32
3	12,51	49,83
4	10,14	59,97
1 (recepe)	18,96	18,96
2 (recepe)	18,96	37,92

Si consideramos la productividad acumulada al cabo de un ciclo completo de producción (turno de 4 años más 2 años de recepe) tendríamos una productividad total acumulada de **97,89 t/ha**.

Obteniéndose una productividad media anual de:

$$97,89 \text{ (t/ha) / 6 años} = \mathbf{16,315 \text{ t/(ha . año)}}$$

Tabla 16.- Producciones anual acumulada para plantaciones energéticas de *Populus x euramericana* I-214 (Fuente de los datos: Marcos Martín F. et al. 2004).

Edad (años)	Productividad acumulada t/ha
1	18,66
2	37,32
3	49,83
4	59,97
5	78,93
6	97,89

Gráfico de Productividad vs Edad de la plantación

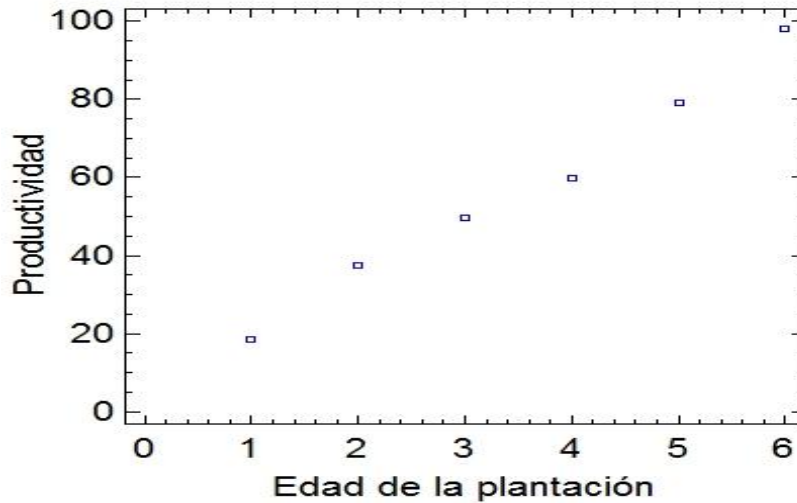


Figura 6.- Representación gráfica del modelo de producción de Marcos Martín F. et al. (2004). (Elaboración propia con ayuda del software estadístico Statgraphics).

Tras representar los datos se ha ajustado un modelo lineal para visualizar la relación entre la edad de la masa y la productividad asociada. El coeficiente de determinación $R^2 = 0,99$ confirma la bondad del ajuste:

Gráfico del Modelo Ajustado
Productividad = $3,988 + 15,1749 \cdot \text{Edad de la plantación}$

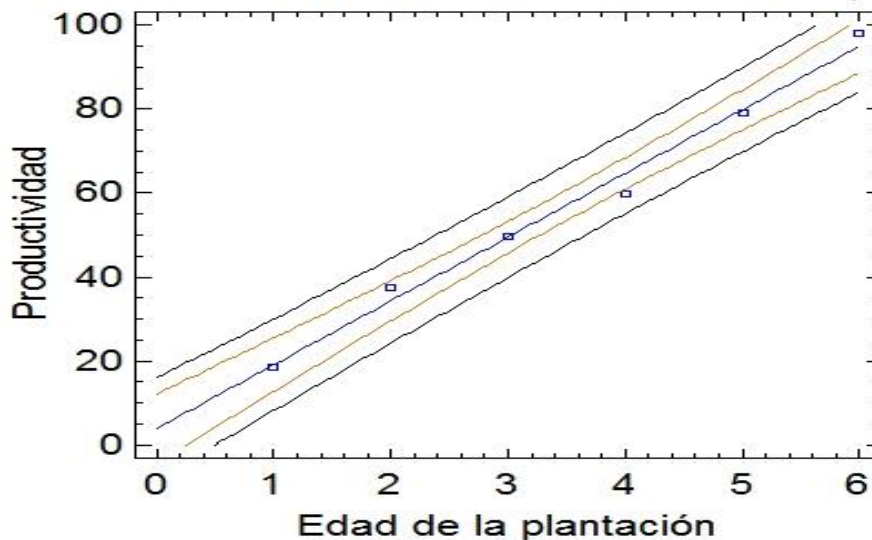


Figura 7.- Ajuste lineal del modelo de producción acumulada de Marcos Martín F. et al (2007). (Elaboración propia con ayuda del software estadístico Statgraphics).



- Estudio de la productividad en biomasa de talleres de chopo a turnos muy cortos (Marcos Martín F. et al. 2007)

En este otro estudio, similar al anterior (marco 0,3 x 0,9 metros y turno de 4 años con un recepe posterior de 2 años) y considerando igualmente los datos obtenidos en plantaciones energéticas experimentales de chopo *Populus x euramericana* I-214 en Cabrerizos (Salamanca) se obtuvieron los siguientes datos de productividad:

Tabla 17.- Producciones estimadas para plantaciones energéticas de *Populus x euramericana* I-214 (Marcos Martín F. et al. 2007).

Edad (años)	Productividad t/(ha.año)	Productividad acumulada t/(ha.año)
1	16,1	16,1
2	16,1	32,2
3	13,6	45,8
4	10,2	56,0
1 (recepe)	17,8	17,8
2 (recepe)	17,8	35,6

Al igual que en el estudio anterior, en el año 1 del turno no se realizaron mediciones de productividad, por lo cual el valor de productividad considerado se estimó haciendo la media de los dos primeros años al final del año 2.

Por otro lado, el menor crecimiento durante los años 3 y 4 del turno llevó a no considerar la productividad a partir del 2º año del recepe.

Si consideramos la productividad acumulada al cabo de un ciclo completo de producción (turno de 4 años más 2 años de recepe) tendríamos una productividad total acumulada de **91,6 t/ha**.

Obteniéndose una productividad media anual de:

$$91,6 \text{ (t/ha)} / 6 \text{ años} = \mathbf{15,27 \text{ t/(ha . año)}}$$



Tabla 18.- Producciones anual acumulada para plantaciones energéticas de *Populus x euramericana* I-214 (Fuente de los datos: Marcos Martín F. et al. 2007).

Edad (años)	Productividad acumulada t/ha
1	16,1
2	32,2
3	45,8
4	56,0
5	73,8
6	91,6

Gráfico de Productividad vs Edad de la plantación

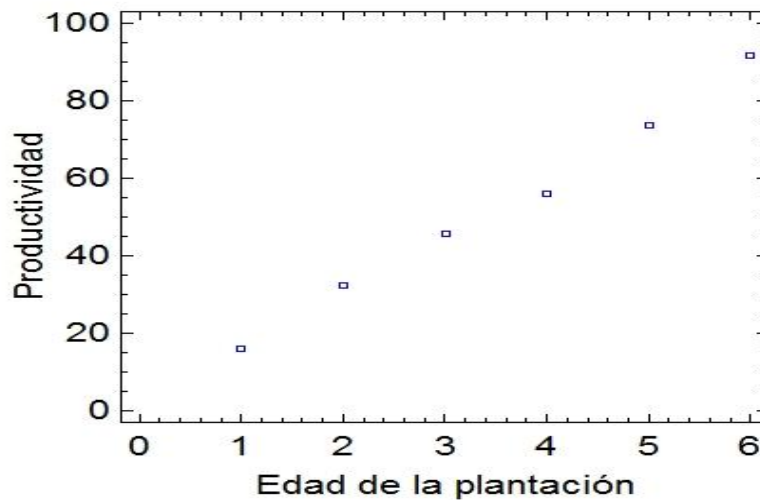


Figura 8.- Representación gráfica del modelo de producción de Marcos Martín F. et al. (2004). (Elaboración propia con ayuda del software estadístico Statgraphics).

Tras representar los datos se ha ajustado un modelo lineal para visualizar la relación entre la edad de la masa y la productividad asociada. El coeficiente de determinación $R^2 = 0,9935$ confirma la bondad del ajuste:

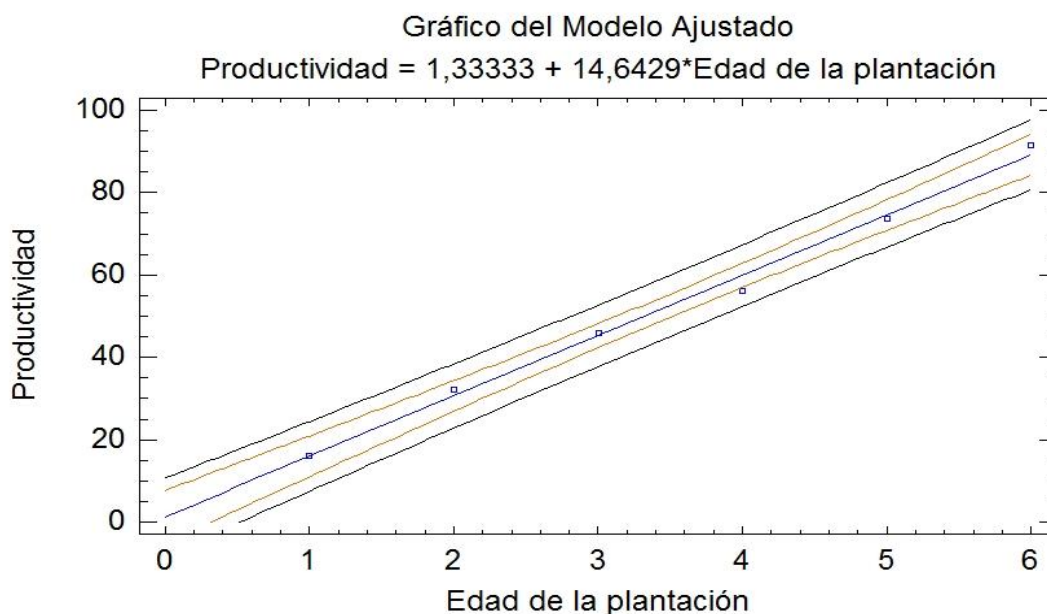


Figura 9.- Ajuste lineal del modelo de producción acumulada de Marcos Martín F. et al (2007). (Elaboración propia con ayuda del software estadístico Statgraphics).

Finalmente, una vez terminado el análisis de los datos de los 3 estudios hemos obtenido la **productividad media anual** en cada uno de ellos, lo cual facilitará realizar comparaciones de la productividad obtenida por plantaciones convencionales de *Populus euramericana* I-214 frente a cultivos energéticos del mismo clon.

Tabla 19.- Comparación de la productividad media anual en los 3 estudios base seleccionados (Fuente: Elaboración propia)

Turno	Estudios considerados	Productividad media anual (t/(ha.año))
15 años	Curvas de calidad y tablas de producción para <i>Populus x euramericana</i> en la Cuenca del Duero. (Bravo et al., 1995)	4,4899
4 años	Tallares de chopo I-214 a turnos muy cortos. (Marcos Martín F. et al., 2004)	16,3150
	Estudio de la productividad en biomasa de tallares de chopo a turnos muy cortos (Marcos Martín F. et al., 2007)	15,2700



4.2. Comparación de la productividad media anual

Para poder comparar la productividad obtenida por plantaciones convencionales de *Populus euramericana I-214* frente a la productividad obtenida por los cultivos energéticos vamos a comenzar por obtener un valor de productividad media anual de los dos cultivos energéticos considerados a partir de la media aritmética de los datos de sus producciones:

Tabla 20.- Obtención de un valor medio de productividad para los datos de los estudios de cultivos energéticos. (Fuente: Elaboración propia)

Edad (años)	Productividad acumulada (Marcos Martín F. et al., 2004) t/ha	Productividad acumulada (Marcos Martín F. et al., 2007) t/ha	Valores medios de productividad acumulada t/ha
1	18,66	16,1	17,38
2	37,32	32,2	34,76
3	49,83	45,8	47,815
4	59,97	56,0	57,985
5	78,93	73,8	76,365
6	97,89	91,6	94,745

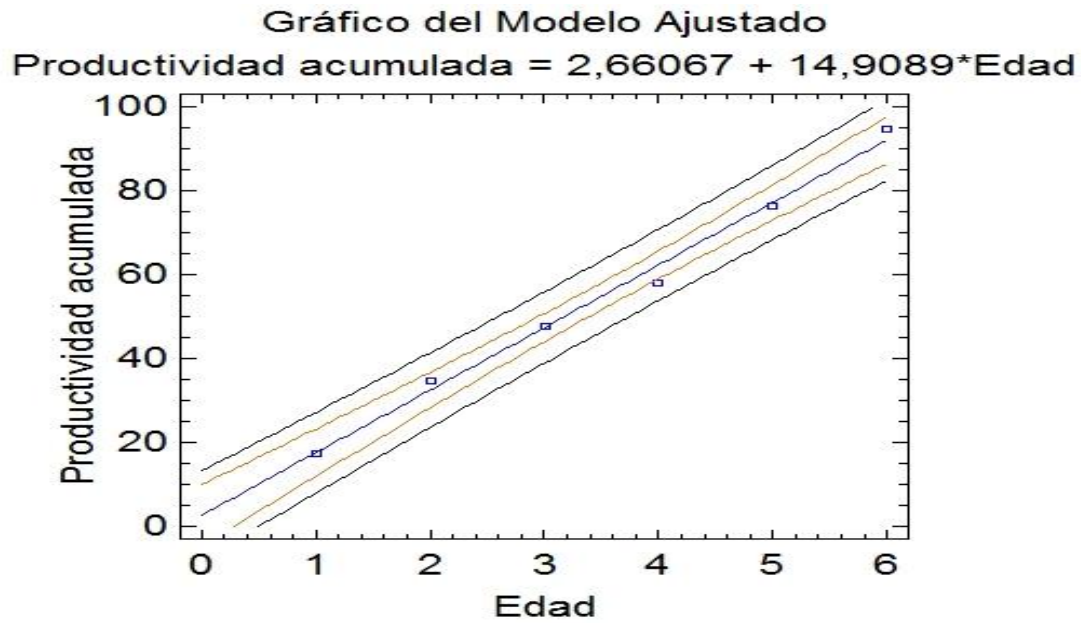


Figura 10.- Ajuste lineal del modelo de producción acumulada para cultivos energéticos de chopo. $R^2=0,9919$ (Elaboración propia a partir de los datos de Marcos Martín et al., con ayuda del software estadístico Statgraphics).

Para comenzar a comparar, desde el punto de vista económico, ambos tipos de plantaciones de *Populus euramericana I-214* consideraremos por tanto los siguientes datos de productividad media anual:

Tabla 21.- Comparación de la productividad media anual. (Fuente: Elaboración propia)

Turno	Productividad media anual (t/(ha.año))
15 años	4,4899
4 años	15,7917



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El hecho de manejar grandes inversiones, quedando inmovilizadas durante un periodo de tiempo relativamente elevado antes de obtener beneficios, obliga a los propietarios forestales a realizar un análisis económico-financiero previo a la implantación del cultivo.

De esta manera también es posible comparar la rentabilidad económica de una chopera tradicional frente a otros tipos de cultivos, valorando así el coste de oportunidad que supone destinar el terreno a uno u otro uso.

El beneficio final de la inversión va a depender por tanto de los costes estimados de explotación del cultivo y de las ganancias al término del ciclo productivo:

- Para la gestión de una hectárea de una plantación tradicional de *Populus euramericana I-214* de calidad II en la Cuenca del Duero (turno de corta de 15 años, plantado a raíz profunda sin riego y a un marco de 6 x 6 metros) vamos a considerar los siguientes costes (fuente: www.soriactiva.com):

- Preparación del terreno e implantación del cultivo: 3.084,73 €/ha
- Gastos de explotación durante los 15 años del turno: 2.758,35 €/ha

Por otro lado, el único ingreso a percibir será el correspondiente al valor de la venta de la madera en pie al final del turno de corta. Este precio de la madera con destino a la industria del desarrollo se ve determinado fundamentalmente por el volumen medio de cada árbol y la homogeneidad de los mismos, la calidad tecnológica de la madera y la accesibilidad a la parcela.

El precio medio de la madera de *Populus euramericana I-214* de calidad II procedente de plantaciones de las características indicadas en este estudio es de 57 €/m³ (FAFCYLE, 2014).

Por tanto, asumiendo una productividad acumulada a final del turno de 232,19 m³/ha (Bravo F. et al., 1995), obtendríamos los siguientes ingresos por cada hectárea:

$$232,19 \text{ m}^3/\text{ha} \times 57 \text{ €/m}^3 = 13.234,83 \text{ €/ha}$$

- En líneas generales vamos a considerar que en el caso de una plantación de *Populus euramericana I-214* con fines energéticos, a turno de 4 años y con alta densidad (marco de plantación 0,3 x 0,9 m) la inversión necesaria para implantar y mantener la masa arbórea oscila entre 3500 y 5000 €/ha (IDAE 2007). En nuestro caso vamos a estimar un precio medio de 4.250 €/ha.



Asimismo, los beneficios proceden de la venta de la biomasa empacada y puesta en planta a un precio neto de 75 €/t ms (IDAE 2007) al final del turno de corta de 4 años, percibiendo nuevamente ingresos tras el recepe de 2 años.

Por tanto, considerando una productividad de 15,7917 t/(ha.año), se obtendrán unos ingresos de 1.184,38 €/(ha.año), que supondrán 4.737,52€/ha al término del turno de 4 años, y 2.368,76 €/ha tras el posterior recepe de 2 años.

Para realizar la comparación en términos de rentabilidad económica de ambos cultivos hay que considerar que en la plantación tradicional la inversión estará inmovilizada durante 15 años, mientras que en la plantación para obtención de biomasa dicha inversión estará inmovilizada durante 4 años hasta la obtención de la primera renta.

Por ello, y para poder comparar más objetivamente y más a largo plazo la rentabilidad, vamos a estimar el desarrollo consecutivo de ciclos de plantación de ambas modalidades de cultivo con un horizonte temporal de 60 años, tratando ambos tipos de cultivos como plurianuales y sin que exista rotación de parcelas.

Teniendo en cuenta que durante 60 años tendríamos 4 ciclos de plantación a turno de 15 años y 10 ciclos de plantación a turno de 6 años (4 años más 2 años de recepe), vamos a realizar una proyección de los flujos de caja en ambos casos a lo largo de los 60 años:

- Plantación tradicional (turno de 15 años):

Tabla 22.- Flujos económicos para plantación tradicional

Ciclo	1 (15 años)	2 (15 años)	3 (15 años)	4 (15 años)
Gastos (€/ha)	5.843,08	5.843,08	5.843,08	5.843,08
Ingresos (€/ha)	13.234,83	13.234,83	13.234,83	13.234,83



➤ Plantación para cultivo energético (6 años):

Tabla 23.- Flujos económicos para cultivo energético

Ciclo		Gastos (€/ha)	Ingresos (€/ha)
1	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
2	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
3	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
4	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
5	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
6	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
7	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
8	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
9	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76
10	4 años	4.250	4.737,52
	2 años (recepe)	–	2.368,76



Una vez estimados los flujos de caja en ambos tipos de plantaciones se ha llevado a cabo una sencilla evaluación económica de ambos cultivos, considerando un contexto de estabilidad de precios y obviando la inflación.

Para ello se ha empleado la herramienta informática de cálculo Microsoft Excel, calculando los indicadores más habituales en análisis de proyectos, lo cual nos orientará sobre la viabilidad y rentabilidad de ambas inversiones:

➤ **VAN:**

El Valor Actual Neto de una inversión indica la suma de los valores actualizados de todos los flujos netos de caja esperados del proyecto, una vez deducido el valor de la inversión inicial.

Si un proyecto tiene un VAN positivo se puede considerar que es un proyecto rentable, lo que significará que recuperaremos la inversión inicial y tendremos más capital que si lo hubieramos destinado a renta fija.

A mayor sea el VAN más rentable es la inversión, por lo tanto este valor resulta útil para comparar la rentabilidad entre varios proyectos.

Por otro lado, un valor nulo del VAN indicaría que la rentabilidad del proyecto es equivalente a colocar los fondos invertidos en el mercado con un interés equivalente a la tasa de descuento utilizada.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Siendo:

V_t : Flujos de caja en cada periodo t.

I_0 : Inversión inicial.

n: nº de periodos considerados

k: Tipo de interés

En nuestro caso, realizando un desglose de los flujos de caja año a año de un ciclo productivo de cada tipo de cultivos tendríamos:



- Ciclo productivo de una plantación tradicional (turno de 15 años):

Tabla 24.- Ciclo productivo de una plantación tradicional

Año	Gastos	Ingresos	Flujo de caja
1	3.084,73	-	-3.084,73
2	197,025	-	-197,025
3	197,025	-	-197,025
4	197,025	-	-197,025
5	197,025	-	-197,025
6	197,025	-	-197,025
7	197,025	-	-197,025
8	197,025	-	-197,025
9	197,025	-	-197,025
10	197,025	-	-197,025
11	197,025	-	-197,025
12	197,025	-	-197,025
13	197,025	-	-197,025
14	197,025	-	-197,025
15	197,025	13.234,83	13.037,81

Considerando 4 ciclos consecutivos a lo largo de 60 años y aplicando la fórmula del VAN anteriormente indicada y una tasa de descuento del 3,5% (Banco de España, 2015) obtendríamos un valor de:

$$\text{VAN} = 6.367,30 \text{ €/ha}$$

Al obtenerse un valor del VAN >0 se puede considerar que sería un proyecto viable. El rendimiento absoluto de la inversión es positivo y la suma de los flujos de caja actualizados es superior al desembolso inicial.



- Ciclo productivo de una plantación para cultivo energético (6 años):

Tabla 25.- Ciclo productivo de una plantación para cultivo energético

Año	Gastos	Ingresos	Flujo de caja
1	4.250	-	-4.250
2	-	-	0
3	-	-	0
4	-	4.737,52	4.737,52
5	-	-	0
6	-	2.368,76	2.368,76

Considerando 10 ciclos consecutivos a lo largo de 60 años y aplicando la fórmula del VAN anteriormente indicada obtendríamos un valor de:

$$\text{VAN} = 9.444 \text{ €/ha}$$

Al obtenerse un valor del VAN >0 se puede considerar que sería un proyecto viable. El rendimiento absoluto de la inversión es positivo y la suma de los flujos de caja actualizados es superior al desembolso inicial.

El valor del VAN en este caso supera en 3.076,7 €/ha al obtenido en las plantaciones de chopo tradicional, por lo que a la vista del resultado podría considerarse más rentable invertir en plantaciones de cultivos energéticos.

➤ **VAN/Inversión :**

Este método de análisis mide la rentabilidad que se obtiene por unidad monetaria invertida, con lo que acota las limitaciones que puede presentar el VAN al analizar proyectos con distintos valores iniciales de inversión:

- Ciclo productivo de una plantación tradicional (turno de 15 años):

$$\text{VAN/Inversión} = 6.367,30 \text{ (€/ha)} / 3.084,73 \text{ (€/ha)} = \mathbf{2,06}$$



- Ciclo productivo de una plantación para cultivo energético (6 años):

$$\text{VAN/Inversión} = 9.444 \text{ (€/ha)} / 4.250 \text{ (€/ha)} = \mathbf{2,22}$$

Se elegirá aquel proyecto que presente este ratio más elevado, por lo tanto sería preferible considerar las plantaciones para cultivos energéticos.

➤ **TIR:**

Se denomina Tasa Interna de Rentabilidad a la tasa de descuento que hace que el VAN de una inversión sea igual a cero, siendo conveniente elegir entre varios proyectos, aquel que ofrezca un mayor valor de TIR.

Por tanto, un proyecto es viable cuando el valor del TIR es superior al tipo de descuento considerado.

Realizando un desglose de los flujos de caja año a año de un ciclo productivo de cada tipo de cultivos, al igual que hemos hecho para el cálculo del VAN, obtendríamos los siguientes valores de TIR:

- Ciclo productivo de una plantación tradicional (turno de 15 años):

$$\mathbf{TIR = 8\%}$$



Figura 11.- Representación gráfica del cálculo del TIR en plantaciones convencionales.

- Ciclo productivo de una plantación para cultivo energético (turno de 6 años):

TIR= 15%

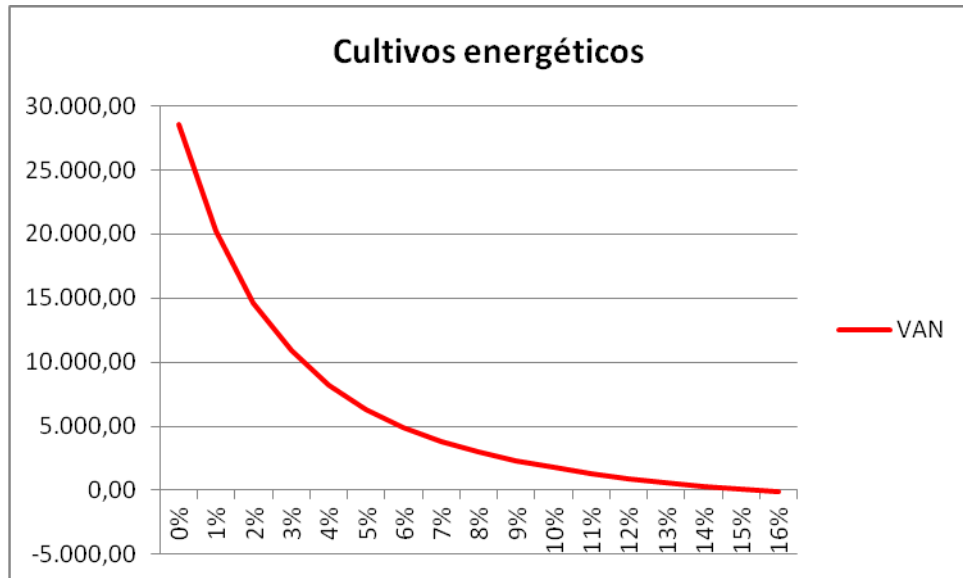


Figura 12.- Representación gráfica del cálculo del TIR en cultivos energéticos.

Ambos valores de TIR superan el valor de la tasa de descuento considerada (3,5%) por lo que pueden considerarse viables. La TIR en cultivos energéticos supera en 7 puntos porcentuales a la TIR en cultivos a turno de 15 años, por lo cual su rentabilidad sería mayor.

➤ **Plazo de recuperación de la inversión:**

Conocido como "**Payback**", permite seleccionar aquellos proyectos cuyos beneficios permiten recuperar más rápidamente la inversión. Para ello considera el número de años que se tarda en recobrar la inversión inicial.

Si supusieramos que los ingresos en cada modalidad de plantación se obtuvieran de manera proporcional en cada año podríamos calcular de manera teórica en cuantos años se recupera la inversión inicial en cada ciclo productivo:



- Plantación tradicional (turno de 15 años):

Considerando en cada ciclo productivo una inversión inicial de 3.084,73 € y unos ingresos finales de 13.234,83 € a fin de turno que desglosaríamos en los 15 años de turno a razón de 882,322 €/año:

$3.084,73\text{€}/882,322(\text{€/año})=3,50$ años se tardaría en recuperar la inversión inicial.

- Plantación para cultivo energético (turno de 6 años):

Considerando en cada ciclo productivo una inversión inicial de 4.250 € y unos ingresos finales de 4.737,52 € al cabo de 4 años y de 2.368,76 € al término de los 6 años del ciclo y desglosando dichos ingresos a lo largo de los 6 años a razón de 1184,38 €/año:

$4.250 \text{€}/1.184,38 (\text{€/año}) = 3,59$ años se tardaría en recuperar la inversión inicial.

Como limitación a estos cálculos, hay que tener en cuenta que no se están considerando los flujos de dinero actualizados. Además a la hora de valorar la rentabilidad de un proyecto, este método no tiene en cuenta el global de los flujos de caja, al no considerar los flujos que se podrían generar una vez recuperado el importe de la inversión.

Aún así, en vista de lo obtenido se tardaría un mes más en recuperar la inversión en las plantaciones energéticas. Sin embargo, considerando el ciclo productivo de cada modalidad de plantación podemos observar que en las plantaciones a turno largo únicamente se perciben ingresos al final del turno de 15 años, permanenciando el dinero invertido inmovilizado hasta entonces y no pudiendo recuperar la inversión inicial.

En cambio en los cultivos energéticos, con turnos productivos más cortos, se perciben ingresos a los 4 y a los 6 años de realizada la inversión inicial, recuperando a los 4 años el dinero invertido y permanenciando el dinero inmovilizado por menos tiempo.

**Tabla 26.-** Tabla resumen del análisis económico

	Cultivos convencionales (Turno 15 años)	Cultivos energéticos (Turno 6 años)
VAN	6.367,30 €/ha	9.444 €/ha
VAN/Inversión	2,06	2,22
TIR	8 %	15 %
Payback	15 años	4 años

Finalmente y en base a los resultados obtenidos podría plantearse que, en Castilla y León y ajustándose a los aspectos contemplados en el presente estudio, los cultivos energéticos de *Populus euramericana I-214* constituirían una alternativa de inversión más rentable que las plantaciones tradicionales del mismo clon.



6. CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos en la evaluación económica de ambos tipos de plantaciones se puede concluir que, pese a la viabilidad económica de ambas alternativas de inversión, la rentabilidad es mayor en las plantaciones destinadas a cultivos energéticos, con un valor del VAN de 9.444 €/ha frente al VAN de 6.367,30 €/ha de los cultivos de chopo a turno tradicional. Además la TIR en cultivos energéticos supera en 7 puntos porcentuales a la TIR en cultivos a turno de 15 años.

En cuanto al plazo de recuperación de la inversión, los cultivos energéticos permiten rentabilizar antes la inversión realizada, puesto que se perciben los primeros ingresos a los 4 años de efectuar la inversión, frente a los 15 años que hay que esperar en cultivos tradicionales.

Aún así, los cultivos de chopo a turno corto precisan de mayor investigación, ya que así como se conoce relativamente bien su selvicultura a turno largo, no existe tanta información sobre la selvicultura a turnos cortos empleada para el aprovechamiento energético de la especie. En esta línea también sería interesante profundizar en el comportamiento en este tipo de cultivos de los distintos clones de chopo disponibles.

Además, la aparición de otros escenarios, como la existencia de posibles líneas de ayudas públicas que incentiven los cultivos energéticos y la consideración de opciones como ubicar las plantaciones en antiguos vertederos o fertilizar con lodos de depuradora, minimizarían los costes de la inversión, a la vez que se contribuiría a la gestión de residuos y a la recuperación de áreas degradadas, aportando un valor añadido a estas plantaciones.

Por otro lado cabe indicar que las conclusiones de este estudio deben entenderse como un indicador en la toma de decisiones, si bien no deben ser consideradas de manera absoluta. Así, un análisis económico más exhaustivo, empleando algún software informático específico (como por ejemplo la aplicación Valproin del Área de Economía de la ETSIIAA de Palencia) facilitaría el análisis de proyectos y permitiría realizar un análisis de sensibilidad contemplando distintos escenarios, considerando distintos tipos de interés e introduciendo parámetros como la tasa de inflación, que permitirían minimizar la incertidumbre y afinar más a la hora de plantear las decisiones de inversión.

Pese a ello, debemos destacar que en base a los alentadores resultados obtenidos en este estudio, tras manejar criterios y datos bibliográficos contrastados, puede preverse que la implantación generalizada de cultivos energéticos optimizaría el uso de recursos forestales de manera eficiente, favoreciendo un sistema energético sostenible y constituyendo frecuentemente una alternativa viable frente a otros cultivos convencionales.





7. BIBLIOGRAFÍA

- **Agencia Provincial de la Energía, Diputación de Ávila & Fundación Cartif** (2008) Biorrefinerías. Una oportunidad de negocio para las zonas rurales y las industrias.
- **Alvarez-Castillo A. et al.** Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos. Revista Iberoamericana de Polímeros, Vol 13(4) Septiembre 2012.
- **Armstrong A. et al.** Effects of spacing and cutting cycle on the yield of poplar grown as an energy crop. Biomass and Bioenergy. 1999
- **Ballard, B.D. et al.** Aboveground biomass equation development for five *Salix* and one *Populus* clone. Misc. Report New York Center for Forestry Research and Development. (1999)
- **Balteiro L., Romero C.,** 2001. Caracterización económica de las choperas en Castilla y León: rentabilidad y turnos óptimos. Actas I Simposio del Chopo. Tomo I, pp. 489-499.
- **Barroso Casillas M.** (2010) Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.
- **Cañellas I. et al.,** The effect of density on short rotation *Populus* sp. plantations in the Mediterranean area. Biomass and bioenergy 46, 645-652. 2012
- **Ciria Ciria M.P.,** Efecto del turno de corta y de la densidad de plantación sobre la productividad de diversos clones de chopo en corta rotación. UPM. Madrid (1998)
- **Coleman et al.,** Post-establishment fertilization of Minnesota hybrid poplar plantations. Biomass and Bioenergy 30(8/9), 740-749. 2006
- **Domínguez A.,** Plantaciones Forestales. Tratado de Fertilización. Ediciones Mundi-Prensa. pp. 518-522 (1997)
- **Expósito Fernández M.M.** (2008) Análisis de alternativas tecnológicas e ingeniería conceptual de una biorrefinería lignocelulósica. Tesis doctoral inédita. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.
- **Fang S. et al.,** Dynamics and biomass production in short-rotation poplar plantations: 6-year results for three clones at four spacings. Biomass and Bioenergy.(1999)



- **García Vallejo et al.** (2001) Características químicas de la madera de chopo. I Simposio del chopo. Junta de Castilla y León.
- **Godino García, M.** (2005) Análisis de los cultivos de *Populus x euroamericana* Dode, clon I-214 a turnos muy cortos con fines energéticos. Tesis doctoral inédita. Universidad Politécnica de Madrid.
- **González Antoñanzas, F.**, Crecimiento y producción en la Meseta Central según calidades de estación de plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador". Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales, nº 44, Madrid. 1986
- **Heilman P, Norby R,** (1998) Nutrient cycling and fertility management in temperate short rotation forest systems. *Biomass and Bioenergy* 14(4): 361-370.
- **Heilman P.E., Xie F.G.,** Effects of nitrogen fertilization on leaf area, light interception, and productivity of short-rotation. *Can J For Res* 24(1), 166-173.(1994)
- **Hernanz, G.;** 2001. La industria del chopo en España. Actas de Populicultura en Castilla y León. I Simposio del chopo. Junta de Castilla y León (2007).
- **Herrick A.M., Brown C.L.,** A new concept in cellulose production- Silage sycamore. *Agricultural Science Review.* 1967
- **Hofmann-Schiele C. et al.** Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. I. Site-growth relationships. *Forest Ecology and Management*, 121, 41-55. (1999)
- **Karacic A., Verwijst T., Weih M.,** 2003. Above-ground Woody Biomass Production of Short-rotation *Populus* Plantations on Agricultural Land in Sweden. Department of Short Rotation Forestry, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden. (2010).
- **Labrecque M. et al.** Early performance and nutrition of two willow species in short-rotation intensive culture fertilized with wastewater sludge and impact on the soil characteristics. *Canadian Journal of Forest Research.* 8 (11), 1621-1635. 1998.
- **Labrecque M. et al.,** Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). Quebec (2004)
- **Laureysens I. et al.** Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture and its relation to soil characteristics. Bélgica. 2004



- **Marcos Martín F. et al.** Caracterización energética de la biomasa de chopo (*Populus x euramericana* I-214). ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 2004
- **Marcos Martín F. et al.** Estudio de la productividad en biomasa de tallares de chopo a turnos muy cortos. ETSI de Montes. (Universidad Politécnica de Madrid). 2007
- **Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.** Encuesta sobre superficie y rendimientos de cultivos. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Estadísticas Agroalimentarias. Madrid. 2013
- **Nassi o Di Naso et al.,** Biomass production and energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. Land Lab Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy. 2006
- **Nixon, D. J.; Stephens, W.; Tyrrel, S. F.; Brierley, E. D. R.,** The potential for short rotation energy forestry on restored landfill caps. 2001
- **Rodríguez F., et al.,** El papel del chopo como sumidero de CO₂ atmosférico. Junta de Andalucía. 2005
- **Rueda J.,** La madera de chopo y sus aplicaciones. Junta de Castilla y León, Valladolid. 1997
- **Sixto Blanco H. et al.,** Manual de cultivo de *Populus* spp. para la producción de biomasa con fines energéticos. INIA. Madrid. 2010
- **Sixto Blanco H. et al.,** Red de parcelas de cultivos leñosos en alta densidad y turno corto. Ministerio de Economía y Competitividad. CIFOR, INIA. Madrid 2013
- **Steinbeck K., Mcalpine R.G., May J.T.,** Short rotation culture of sycamore; a status report. Journal of Forestry. 1972
- **Tubby I. et al.,** Establishment and management of short rotation coppice. Edinburgo. 2002
- **Weber et al.,** Genetic variation and productivity of *Populus trichocarpa* and its hybrids. I. Morphology and phenology of 50 native clones. Canadian Journal of Forest Research. 1985



Webs consultadas:

www.abengoa.es

www.avebiom.org

www.bioenarea.eu

www.cartif.com

www.efor.ucl.ac.be/ipc/inicio.htm

www.europaforestal.com

www.hardwoodbiofuels.org

www.idae.es/

www.inia.es

www.irnas.csic.es

www.jcyl.es

www.mapya.es/agricultura/pags/chopo/cnchopo.htm

www.oncultivos.es

www.pfcyl.es

www.portalforestal.com

www.profor.org

www.secforestales.org