

Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión

H. Sixto^{1*}, M. J. Hernández¹, M. Barrio², J. Carrasco³ e I. Cañellas¹

¹ Departamento de Sistemas y Recursos Forestales. CIFOR-INIA. Ctra. A Coruña, km 7,5. 28040 Madrid. España

² Departamento BOS. Área de Ingeniería Agroforestal. UE de Ingenierías Técnicas. Universidad de Oviedo.
C/ Gonzalo Gutiérrez de Quirós, s/n. 33600 Oviedo. España

³ Departamento de Energías Renovables. CIEMAT. Avda. Complutense, 22. 28040 Madrid. España

Resumen

La necesidad de incrementar la producción de energía de origen renovable en España, pasa por considerar la producción de biomasa como una de las posibles alternativas. Entre los diferentes tipos de biomasa posible, aquella que se obtiene a través de cultivos diseñados específicamente para ello, los cultivos energéticos, permite la planificación en la obtención del recurso al mismo tiempo que proporcionan alternativas al abandono de cultivos tradicionales en el ámbito rural. El presente trabajo tiene como objetivo revisar el estado actual de conocimiento de uno de los cultivos leñosos con mayores expectativas para la producción de energía, las plantaciones de *Populus* spp. cultivado en alta densidad y turnos cortos, en su contribución a la producción de biomasa para energía, incidiendo en la importancia del material base a emplear, el diseño del cultivo y los tratamientos culturales a realizar.

Palabras clave: biomasa, cultivos energéticos, chopo, SRF.

Abstract

Populus genus for the biomass production for energy use: a review

Much attention is currently focused on biomass production as one possible alternative energy source because of the need to increase the amount of energy produced in Spain from renewable energy sources. Amongst the different types of biomass available, those crops which are specifically designed for the purpose, the so-called «energy crops», allow us not only to plan the production of this resource but also to provide a viable alternative for agricultural land in areas where traditional crops are gradually being abandoned. The objective of this study is to revise the current knowledge base in relation to *Populus* spp.; a woody crop with great potential for this purpose which can be grown at high densities in short rotation coppices. Its suitability for the production of energy producing biomass will be assessed, focusing in particular on the base material to be employed, the plantation design and the cultural treatments to be applied.

Key words: biomass, energy crops, poplar, SRF.

Introducción

El Plan de Fomento de las Energías Renovables (PFER) en España (2005-2010) (IDAE, 2004) señala la excesiva dependencia exterior en materia energética (80%), siendo necesario, tanto por motivos de estrategia económica como social y medioambiental, procurar que se produzcan incrementos significativos de las fuentes de energía renovable, entre ellas la biomasa, al mismo tiempo que se incida en la mejora de la eficiencia energética. Sin embargo, la revisión del

PFER para el periodo 1999-2004 (IDAE, 2004) indicó un desarrollo muy inferior al deseable en el área de la biomasa para poder cumplir con los objetivos fijados.

Los nuevos retos comunitarios, más ambiciosos en cuanto a utilización de energías renovables para 2020, requieren, por otra parte, incrementar el uso de biomasa para la producción de calor, electricidad y biocombustibles.

El ámbito de la biomasa se encuentra condicionado, en general, por una fuerte heterogeneidad, tanto por el tipo de materia prima a emplear como por los posibles usos energéticos derivados, así como por su interferencia con los mercados agrícola y forestal. Tradicionalmente su uso ha sido térmico, habiéndose de-

* Autor para la correspondencia: sixto@inia.es

Recibido: 21-09-07; Aceptado: 29-11-07.

sarrollado aplicaciones eléctricas o como biocarburantes principalmente en las dos últimas décadas. El crecimiento del sector, en cualquier caso, está fuertemente condicionado por el desarrollo de un mercado maduro de suministro. En este sentido, el aprovechamiento de cultivos energéticos, tanto herbáceos como leñosos, pueden suponer una utilización planificada del recurso frente a las biomásas residuales cuya producción está desligada de objetivos de producción energética, estando además disponibles grandes extensiones de superficie, agrícolas y forestales, con características adecuadas para su implantación.

La crisis energética de principios de los 70 reorientó el interés por las energías renovables y la biomasa en particular y en la última década este interés se está potenciando por otros factores cada vez más prioritarios para la sociedad occidental como son la necesidad de disminuir las emisiones de efecto invernadero y la reducción, en general, de las emisiones del sector energético tradicional, la disminución de la dependencia energética del exterior y la necesidad de sustituir los combustibles fósiles tradicionales por otras energías para prevenir los efectos de su eventual agotamiento.

En este contexto, el interés por los cultivos energéticos como forma especializada de producción de materias primas para la producción de energía ha ido en aumento en los últimos veinte años y en la actualidad puede afirmarse que los cultivos energéticos constituyen un pilar básico sobre el que descansan las mayores expectativas de desarrollo de producción energética a partir de fuentes renovables a corto y medio plazo en las políticas de numerosos países, entre los que se incluyen la propia Unión Europea y los países que la componen. Así, en España, el vigente Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010 adoptado tras la revisión del ya mencionado PFER, contempla que a partir de biomásas de cultivos energéticos, incluidas las materias primas agrícolas para biocarburantes, se produzcan 3,87MTEP en 2010, casi un 40% (37,1%) del incremento anual total previsto de producción de energía renovable en relación a la producción de 2005.

A pesar de estas importantes expectativas, el grado de desarrollo alcanzado por los cultivos energéticos es relativamente pequeño en relación a los objetivos energéticos esperados. Esta situación es, no obstante, diferente del tipo de cultivos energéticos de que se trate. Así, los cultivos agrícolas dedicados a la producción de biocarburantes de primera generación han adquirido un grado de desarrollo significativo, y actualmen-

te constituyen el sector más dinámico dentro del sector de la biomasa, debido a la falta de incertidumbre que suponen para el agricultor al tratarse de especies agrícolas tradicionales, y haber existido incentivos adecuados para su implantación comercial (ayudas de la PAC a los cultivos o Directiva para la sustitución de los combustibles fósiles de los vehículos por biocarburantes en 2010). En contraste con esta situación, los cultivos energéticos de tipo lignocelulósico, entre los que se incluyen especies herbáceas y leñosas, no cuentan con medidas similares (tan sólo hace dos años que los cultivos lignocelulósicos reciben ayudas de la PAC) a nivel de la Unión Europea (UE) y, de esta forma, su desarrollo ha quedado a expensas de cada país miembro. En la práctica, esta situación ha retrasado el necesario desarrollo tecnológico que requiere este tipo de cultivos al ser nuevas especies o bien especies ya conocidas pero cuyas condiciones de cultivo son diferentes a las tradicionales y, por tanto, la posibilidad incluso de su implantación comercial.

Esta insatisfactoria situación de los cultivos energéticos lignocelulósicos ha sido analizada a nivel de la UE y de España en el contexto del muy deficiente desarrollo logrado en las aplicaciones térmicas y eléctricas de la biomasa a las que estos cultivos deben aportar, según las previsiones, la mayor parte del incremento de biomasa previsto y de esta forma es posible que en un futuro podamos asistir a una situación de incentivos y soporte más adecuados para lograr su desarrollo e implantación comercial. En nuestro país la reciente publicación del Real Decreto 661/2007 que incrementa de forma sustancial la tarifa para la electricidad producida de la biomasa y en particular la producida a partir de biomásas de cultivos, podría ser una antesala, aún modesta, para conseguir los objetivos propuestos.

La producción de biomasa lignocelulósica mediante el método de beneficio en monte bajo (corta y regeneración de la masa mediante rebrotes de cepa o raíz) ha sido empleada por el hombre desde la antigüedad, proporcionando aportes de esta materia prima concentrados tanto el espacio como en el tiempo. En la última década, los cultivos forestales en turnos cortos (Short Rotation Forestry, *SRF*, en terminología anglosajona) cobran relevancia, al constituir una forma adecuada de proporcionar materia prima en plazos relativamente cortos. Su destino puede ser, principalmente, la producción de energía mediante diferentes métodos de transformación (actualmente en aplicaciones térmicas y eléctricas), contribuyendo a la

menor dependencia energética, dando una oportunidad real de uso a terrenos agrícolas excedentarios y, por tanto, incidiendo positivamente en el desarrollo rural al mismo tiempo que proporcionaría importantes beneficios medioambientales. Esta modalidad de cultivo (SRF) está considerada entre las más prometedoras en cuanto a su capacidad de proporcionar biomasa para energía (Ledin y Willebrand, 1995; Paris *et al.*, 2005).

Se consideran cultivos forestales en turnos cortos (SRF) aquellos en los que se utilizan especies de crecimiento rápido, bajo un sistema de manejo intensivo y con un turno de corta entre los 2 y 10 años (Makeschin, 1999; Weith, 2004). Dependiendo de diferentes factores, como las especies utilizadas, las condiciones edafoclimáticas o el destino final que se plantee dar a la biomasa producida, los cultivos forestales en turnos cortos pueden realizarse mediante el cultivo de fustes individuales o recepando para producir múltiples brotes, lo que en la terminología anglosajona se denomina short rotation coppice (SRC), con variaciones en la densidad inicial y en el turno de corta aplicado (Mitchell *et al.*, 1992; Deraedt y Ceulemans, 1998).

Las especies potenciales a considerar para la producción de biomasa mediante el sistema SRC deben poseer una serie de características importantes, entre las que destacan las siguientes: i) poseer alto poder energético y calidad como combustible, ii) procurar altas producciones de biomasa en peso seco, iii) poseer rápido crecimiento juvenil, iv) mostrar buena capacidad de rebrote, v) tener copas estrechas o gran tamaño de hojas en la parte superior de la copa y, vi) presentar gran adaptabilidad a diferentes sitios y resistencia a estrés bióticos y abióticos, entre otros (Ranney *et al.*, 1987; Ceulemans *et al.*, 1996). Estos requisitos pueden inicialmente ser satisfechos por numerosas especies pioneras que se caracterizan por poseer un gran crecimiento inicial, lo que les permite competir satisfactoriamente por los recursos disponibles (agua, nutrientes y luz).

Los beneficios medioambientales asociados a estas plantaciones son igualmente relevantes y están bien documentados, ya que actúan como sumideros de carbono, contribuyendo a la reducción de gases efecto invernadero (Isebrand y Karnosky, 2001), resultan adecuados para la fitoremediación de suelos y control de la erosión (Licht y Isebrands, 2005), considerándose el hecho de que sean perennes una ventaja frente a cultivos anuales arables (Powlson *et al.*, 2005). Igualmente actúan como eficaces cortavientos y sirven de

refugio a la fauna, habiéndose puesto de manifiesto una elevada riqueza en cuanto a diversidad de especies que son capaces de albergar (Mirck *et al.*, 2004) así como de mejorar la diversidad paisajística en las áreas donde se introducen (Twedt *et al.*, 1999). En este sentido Christian *et al.* (1994) consideran que la biodiversidad presente en estas plantaciones es sensiblemente superior a la de los cultivos que sustituyen. La capacidad de poder regenerar la masa tras la corta conlleva otras ventajas asociadas de índole económica, por el bajo coste que supone la instalación de la plantación en el tiempo. Todo ello hace posible conjugar el interés productivo y el medioambiental. Por el contrario, la necesidad de riego en estos cultivos en nuestras latitudes, pese a ser muy inferior a la de otros cultivos tradicionales como por ejemplo el maíz, no dejan de suponer un inconveniente que puede y debe ser solventado mediante la aplicación de sistemas de riego más racionales y la utilización de material vegetal altamente eficiente en el uso del agua.

De entre las muchas especies arbóreas forestales que potencialmente pueden ser utilizadas para la producción de biomasa en turnos cortos cabe destacar *Robinia pseudoacacia* (Candilo *et al.*, 2004), *Ailanthus altissima* (Itabia, 2002), *Fraxinus* spp. (Khamzina *et al.*, 2006), *Acacia* spp. (Goel y Behl, 2004), *Alnus* spp. (Ledin y Willebrand, 1995), *Casuarina* spp. (Chaturvedi, 1998), *Paulownia* spp. (Mezzalana y Brocchi, 2002), *Gmelina arborea* (Diaz y Tandug, 1999) *Platanus* spp. (DeBell y Harrington, 1993), *Prosopis* spp. (Lemus y Lal, 2005), *Tectona* spp. (Chaturvedi, 1998), *Ulmus pumila* (DeBell y Harrington, 1993), diferentes géneros agrupados bajo la denominación de bambúes como *Bambusa* spp. (Scurlock *et al.*, 2000) o *Yushane* spp. (Kassahun, 2001), etc., sin embargo, los géneros *Salix*, *Populus* y *Eucalyptus* se consideran como los de mayor potencial en el ámbito de la Unión Europea (Armstrong *et al.*, 1999). Se trata de especies de crecimiento muy rápido, que cuentan además con una base genética amplia, ciclos de mejora breves, facilidad para la multiplicación vegetativa, capacidad de rebrotar tras la corta, etc., características, todas ellas, que las adecuan para esta finalidad productiva. Adicionalmente, la madera de chopo posee una elevada adecuación para la combustión, con bajo nivel de emisiones (Scholz y Ellerbrock, 2002) y baja tendencia a la sinterización, lo que repercute en el buen funcionamiento y bajo mantenimiento de los equipos. Igualmente la eficiencia energética se considera muy elevada, citando Scholz y Liubarskij (2005) valores entre

155 y 167 GJ ha⁻¹, y el balance energético muy positivo frente a otros cultivos utilizados con este mismo propósito, en torno a 13 (Balsari y Airoidi, 2002) llegando incluso a citarse balances que alcanzan el 20.

En la actualidad, en países europeos como Dinamarca, Gran Bretaña o Suecia, esta última con más de 16.000 ha (Christersson y Verma, 2005) de SRF, están a la cabeza en cuanto a aplicaciones comerciales de cultivos forestales en turnos cortos, desarrollándose una investigación activa y aplicando, en muchos casos, una política de incentivos dirigida a la valorización energética de la biomasa. También en Italia (referente español en populicultura tradicional) se ha desarrollando una intensa actividad multidisciplinar que abarca toda la cadena productiva, con una superficie de plantación prevista para el año 2007, con híbridos de chopo, de más de 7.700 ha de SRF (Nardin, comunicación personal, 2006).

El interés por esta modalidad de cultivo destinado a la producción de energía no solo se circunscribe a la UE, existiendo múltiples referencias en Canadá (Wetman, 2000), China (Liang *et al.*, 2006), India (Singh y Behl, 2001) o Estados Unidos de América (Updegraff *et al.*, 2004), país este último en el que el Departamento de Energía desarrolló un programa específico sobre este sistema de producción ensayando el comportamiento de más de 25 especies forestales en una red de ensayos que incluía 380 localizaciones (DeBell y Harrington, 1993).

En nuestro país, el interés por la producción de biomasa con especies forestales en turnos cortos y en concreto con híbridos de *Populus*, más adecuado que *Salix* spp. para estos objetivos debido a las características ecológicas de la Península Ibérica, se remonta a mediados de los años ochenta (San Miguel y Montoya, 1984; Marcos, 1985; Ciria *et al.*, 1996). Sin embargo, es en estos momentos cuando se está produciendo un debate generalizado entre las distintas instituciones y el tejido empresarial, dentro del amplio marco que constituye la utilización de la biomasa y de los cultivos energéticos y en particular los lignocelulósicos. El reto de ampliar las fuentes de energía renovable en el actual escenario mundial obliga a nuestro país a profundizar en las oportunidades para la biomasa.

El presente trabajo pretende ser una revisión sobre el estado del conocimiento del cultivo con especies e híbridos de *Populus* para su uso en SRF con el objetivo de proporcionar biomasa para energía. Para ello se reseñará la importancia del material de base a utilizar en las plantaciones, el efecto de la densidad de culti-

vo y turno de corta así como la incidencia que los diferentes tratamientos culturales (control de malas hierbas, fertilización, control de plagas y enfermedades y riegos) tienen en el cultivo. Igualmente se tratará de establecer unas consideraciones de índole general para poder abordar con éxito estas plantaciones.

Adecuación del material de base. Selección clonal

La producción de biomasa lignocelulósica mediante la utilización de especies o de híbridos del género *Populus* se encuentra fuertemente influenciada por el material vegetal utilizado así como por las características del sitio de cultivo, siendo muchos los autores que han aludido a esta interacción genotipo-ambiente, entre ellos Tharakan *et al.* (2001).

El género, que comprende 29 especies (Eckenwalder, 1996) presenta un amplio rango de variabilidad, con gran capacidad para la hibridación tanto inter-específica como intra-específica, lo que se ha relacionado con su gran capacidad de adaptación a distintas condiciones medioambientales (Farmer, 1996), si bien los mejores comportamientos se producen en suelos frescos y profundos. Se consideran especies altamente productivas en su mayoría, con altos requerimientos lumínicos y en general, también hídricos. La capacidad de hibridación y la facilidad para la multiplicación vegetativa ha contribuido a que se desarrolle una oferta clonal muy extensa, con genotipos que reúnen características deseables para diferentes usos, lo que sin duda favorece su expansión y facilidad de cultivo.

Conseguir producciones elevadas al mismo tiempo que se atienden otras características de interés para el cultivo en alta densidad (p.ej. resistencia a plagas y enfermedades, capacidad de rebrote tras la corta, etc.) requiere importantes esfuerzos de mejora genética, de tal forma que se consiga la idoneidad del material para el uso requerido. A través de las técnicas de mejora clásica (Stanton, 1995; Nardin y Alasia, 2004) y en la actualidad también con la ayuda de la biotecnología (Marchadier y Sigaud, 2005), se han realizado importantes avances que permiten obtener cada vez materiales más adecuados. El conocimiento de la aptitud de los materiales para las diferentes zonas potenciales de cultivo, a través de ensayos de comparación clonal, permitirá la elección del genotipo o genotipos más idóneos, siendo éste un requisito necesario para la correcta implantación de estos cultivos.

La Comisión Internacional del Álamo definió, en 1985, el idiotipo de clon ideal susceptible de ser utilizado en cultivo en turnos cortos y que se caracterizaba, entre otras cosas, por presentar un crecimiento juvenil rápido, producción elevada y continua de brotes, capacidad de crecer en altas densidades, amplia utilización del periodo vegetativo y respuesta positiva a los tratamientos culturales, entre otros.

Así, los chopos balsámiferos (sección Tacamahaca) y los híbridos Tacamahaca \times Aigeiros se postulaban inicialmente como los más adecuados para esta finalidad, ya que crecían mejor en densidad y mostraban menos exigencias para el crecimiento y mayor tolerancia a plagas y enfermedades que los híbridos de *P. \times canadensis* (Kauter, 1999). Han sido numerosas y frecuentes las referencias a la idoneidad de su comportamiento, tal es el caso de clones como 'Beaupre' y 'Raspalje' (Pontailier *et al.*, 1999; Ciria, 1998), 'Trichobel' y 'Fritzi Pauley' (Armstrong *et al.*, 1999) o 'Hoogvorst' (Bunn *et al.*, 2004), sin embargo también es cierto que numerosos clones híbridos de *P. \times canadensis* han mostrado producciones similares, como es el caso de 'Ghoy' (Tubby y Armstrong, 2002) y también que la sección Aigeiros es considerada como la más relevante del género *Populus* por las especies e híbridos que incluye, no solo para la populicultura tradicional sino también para SRF (Arsia, 2004).

El factor latitudinal de los diferentes ecotipos se ha relacionado estrechamente con la longitud del periodo vegetativo (Howe *et al.*, 1995), de tal forma que el origen del material vegetal puede ser muy importante tanto para la supervivencia como para conseguir crecimientos adecuados (Ilstedt, 1996).

En la última década ha sido abundante la información generada en relación al comportamiento clonal de especies e híbridos de *Populus* para la producción de biomasa en diferentes países como Inglaterra (Benbrahim *et al.*, 2000), Francia (Jossart *et al.*, 1999), Estados Unidos (Tharakan *et al.*, 2001), Canadá (Labrecque y Teodorescu, 2005), China (HuanChao *et al.*, 2001) o Italia (Nardin y Alasia, 2004). En este último país, el catalogo nacional de materiales de base recoge de manera transitoria, híbridos seleccionados específicamente para esta finalidad productiva.

En general, las producciones obtenidas en los diversos ensayos resultan heterogéneas, ya que además de ser dependientes del clon y del sitio, otros factores como la densidad, el turno o los tratamientos culturales aplicados e incluso el tamaño de la parcela experimental inciden en ella. Pese a que estas variables

hacen difícil la comparación, existen referencias que sitúan esta producción en torno a 20 t ha⁻¹ año⁻¹ en materia seca (M.S.) en ensayos con diversos clones en Italia (Mareschi *et al.*, 2005); 12 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹ con 'Beaupre' en Francia (Bewa y Gavaland, 1999); entre 16 a 18 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹ para clones experimentales NM6 y NM5 (*P. maximowiczii* \times *P. nigra*) en Canadá (Labrecque y Teodorescu, 2005), 13 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹ en Inglaterra (Armstrong *et al.*, 1999), considerándose como producciones medias entre 8 y 12 t M.S. ha⁻¹ año para el norte y centro de Europa (Makeschin, 1999).

La alta variación genotípica presente en el chopo en cuanto a producción de biomasa da lugar a diferencias significativas entre clones para determinados ensayos (Tabla 1). Así, Facciotto *et al.* (2006) citan producciones que oscilaban entre 15 y 35 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹ para los clones 'I-214' (*P. \times canadensis*) y '85-036' (*P. deltoides*), respectivamente. Igualmente Pontailier *et al.* (1999) encuentra diferencias significativas en las producciones entre 'Beaupre', 'Raspalje', 'Fritzi-Pauley' y 'Robusta', incidiendo al igual que Ceulemans y Deraedt (1999) en las diferencias clonales. Además, clones que destacan sobre otros en la primera rotación pueden comportarse de manera más mediocre en turnos sucesivos debido a su diferente respuesta al recorte (Laureysens *et al.*, 2004), poniendo de manifiesto la necesidad de tener en cuenta la adecuación del clon para cada uno de los diferentes factores que intervienen en la producción final.

El Catalogo Nacional de Material de Base (C_{NMB}) para el género *Populus* contiene en la actualidad 28 clones pertenecientes a diferentes especies e híbridos del género que han sido incluidos preferentemente por su adecuación para la producción de madera para desarrollo y aserrío, desconociéndose para muchos de ellos el potencial que pueden ofrecer para la producción de biomasa en SRF. En la década de los años ochenta en nuestro país se explora la capacidad productiva de diferentes clones en SRF, mostrando I-214 superioridad frente a otros clones de *P. \times canadensis* como Canadá Blanco o Chopa de Granada, previendo producciones en torno a 20 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹ (San Miguel y Montoya, 1984). Trabajos posteriores en los que se amplía el abanico clonal a ensayar ponen de manifiesto una mejor aptitud de clones de chopos balsámiferos frente a otros clones pertenecientes a las especies *P. deltoides* y *P. nigra* (San Miguel *et al.*, 1992). Una mayor adecuación de los híbridos de *P. \times generosa* como 'Raspalje', 'Boelare', 'Unal' o 'Beaupre' ha

Table 1. Producción (kg M.S ha⁻¹ año)⁻¹ en función de los clones, turnos y rotación en plantaciones de *Populus* en Short Rotation Forestry (SRF)

| Especies e híbridos de <i>Populus</i> | Clon | Densidad (pies ha) ⁻¹ | Turno | Rotación | País | Producción (kg M.S. ha ⁻¹ año) ⁻¹ | Referencia |
|---|---------------|----------------------------------|-------|----------------|----------|---|----------------------------------|
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | 44-136 | 10.000 | 4 | 1 ^a | USA | 21,0 | Scarascia <i>et al.</i> , 1997 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | 11-11 | 10.000 | 4 | 1 ^a | USA | 35,0 | Scarascia <i>et al.</i> , 1997 |
| <i>P. trichocarpa</i> | 1-12 | 10.000 | 4 | 1 ^a | USA | 13,6 | Scarascia <i>et al.</i> , 1997 |
| <i>P. deltoides</i> | ILL-005 | 10.000 | 4 | 1 ^a | USA | 14,1 | Scarascia <i>et al.</i> , 1997 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Hazendans | 10.000 | 4 | 1 ^a | Bélgica | 11,4 | Laureysens <i>et al.</i> , 2004 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Hoogvorst | 10.000 | 4 | 1 ^a | Bélgica | 10,4 | Laureysens <i>et al.</i> , 2004 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 10.000 | 2 | 1 ^a | Italia | 9,7 | Facciotto y Schenone, 1998 |
| <i>P. deltoides</i> | Lux | 10.000 | 2 | 1 ^a | Italia | 10,0 | Facciotto y Schenone, 1998 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 5.000 | 4 | 1 ^a | España | 12,4 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | Campeador | 5.000 | 4 | 1 ^a | España | 10,0 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | Canada Blanco | 5.000 | 4 | 1 ^a | España | 8,4 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 5.000 | 2 | 1 ^a | España | 10,90 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 5.000 | 3 | 1 ^a | España | 10,10 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 5.000 | 5 | 1 ^a | España | 17,30 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 10.000 | 4 | 1 ^a | España | 16,90 | San Miguel y Montoya, 1984 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | I-214 | 33.333 | 2 | 1 ^a | España | 15,10 | Marcos <i>et al.</i> , 2002 |
| <i>P. nigra</i> | Wolterson | 10.000 | 3 | 2 ^a | Belgica | 9,70 | Laureysens <i>et al.</i> , 2005 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Hoogvorst | 10.000 | 3 | 2 ^a | Bélgica | 3,00 | Laureysens <i>et al.</i> , 2005 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Hazendans | 10.000 | 3 | 2 ^a | Bélgica | 3,50 | Laureysens <i>et al.</i> , 2003 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Hoogvorst | 10.000 | 3 | 1 ^a | Bélgica | 10,10 | Laureysens <i>et al.</i> , 2003 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Hazendans | 10.000 | 3 | 1 ^a | Bélgica | 10,80 | Laureysens <i>et al.</i> , 2003 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Beaupré | 15.625 | 2 | | Francia | 29,00 | Pontailleur <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Raspalje | 15.625 | 2 | | Francia | 27,00 | Pontailleur <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. deltoides</i> | Lux | 10.000 | 1 | 1 ^a | Italia | 10,70 | Bonari <i>et al.</i> , 2004 |
| <i>P. deltoides</i> | Lux | 10.000 | 2 | 1 ^a | Italia | 16,30 | Bonari <i>et al.</i> , 2004 |
| <i>P. deltoides</i> | Lux | 10.000 | 3 | 1 ^a | Italia | 21,70 | Bonari <i>et al.</i> , 2004 |
| <i>P. maximowiczii</i> × <i>P. nigra</i> | NM5 | 18.000 | 4 | 1 ^a | Canadá | 16,62 | Labrecque y Teodorescu, 2005 |
| <i>P. maximowiczii</i> × <i>P. nigra</i> | NM6 | 18.000 | 4 | 1 ^a | Canadá | 18,05 | Labrecque y Teodorescu, 2005 |
| <i>P. balsamifera</i> × <i>P. trichocarpa</i> | Tacatricho 22 | 10.000 | 5 | 1 ^a | R. Unido | 11,20 | Proe <i>et al.</i> , 2002 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Beaupré | 10.000 | 2 | 1 ^a | R. Unido | 9,60 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Boelare | 10.000 | 2 | 1 ^a | R. Unido | 8,20 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> | Trichobel | 10.000 | 2 | 1 ^a | R. Unido | 7,40 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Beaupré | 10.000 | 4 | 1 ^a | R. Unido | 12,8 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Boelare | 10.000 | 4 | 1 ^a | R. Unido | 9,20 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> | Trichobel | 10.000 | 4 | 1 ^a | R. Unido | 13,60 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Beaupré | 10.000 | 2 | 2 ^a | R. Unido | 8,50 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Boelare | 10.000 | 2 | 2 ^a | R. Unido | 6,10 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> | Trichobel | 10.000 | 2 | 2 ^a | R. Unido | 7,90 | Armstrong <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Beaupré | 15.625 | 9 | 2 ^a | Francia | 28,10 | Pontailleur <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | Campeador | 10.000 | 5 | 1 ^a | España | 12,10 | Ciria <i>et al.</i> , 1996 |
| <i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i> | Dorskamp | 10.000 | 5 | 1 ^a | España | 6,30 | Ciria <i>et al.</i> , 1996 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Boelare | 10.000 | 5 | 1 ^a | España | 16,60 | Ciria <i>et al.</i> , 1996 |
| <i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i> | Raspalje | 10.000 | 5 | 1 ^a | España | 19,80 | Ciria <i>et al.</i> , 1996 |
| <i>P. deltoides</i> | G3 | 40.000 | 4 | 1 ^a | India | 12,91 | Singh y Behl, 2001 |
| <i>P. deltoides</i> | G48 | 40.000 | 4 | 1 ^a | India | 11,57 | Singh y Behl, 2001 |
| <i>P. deltoides</i> | G121 | 40.000 | 4 | 1 ^a | India | 13,34 | Singh y Behl, 2001 |

sido referida por Ciria (1998) en condiciones altitudinales específicas (más de 1000 m), citándose producciones medias en torno a 10.3 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹, si bien en los mejores clones éstas fueron del orden de 16,5 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹. Marcos *et al.* (2002) citan para el clon I-214, producciones de 24 t M.S. ha⁻¹ año⁻¹, con densidades de 37.037 pies ha⁻¹ y aplicando turnos de 2 años.

En la actualidad en nuestro país es necesario establecer un amplio abanico de posibilidades dentro de la oferta clonal existente, de tal forma que se sea posible utilizar el material más adecuado según las características concretas de cada sitio. Igualmente puede ser de interés conocer la respuesta de los clones cuando se cultivan en plantaciones mixtas, de tal forma que a través de la diversidad genética se garantice un mejor comportamiento frente a problemas potenciales como los fitopatológicos (Pinon y Valadon, 1997). Sin embargo, en las plantaciones mixtas hay que analizar también los problemas de competencia precoz que se pueden producir entre los clones empleados. Una solución alternativa puede ser el realizar las plantaciones en un conjunto de teselas de clones puros utilizando un sistema policlonal en donde se incluyan los materiales más adecuados para cada sitio.

En este sentido se han puesto en marcha ensayos clonales localizados en diferentes comunidades autónomas articulados dentro de un proyecto singular estratégico de cultivos energéticos auspiciado por el Ministerio de Educación y Ciencia y un proyecto de la convocatoria de recursos y tecnologías agrarias del INIA. En dichos ensayos, entre otros factores, se comparan clones incluidos en el C_{NMB} para el género *Populus* (p. ej. 'Viriato', 'USA 49-177', 'Unal', etc.), así como de clones inscritos en el registro italiano mediante la vía provisional para la producción de biomasa tales como 'Monviso', 'Pegaso' y 'AF2' (Sixto *et al.*, 2006), habiendo mostrado estos últimos en ensayos realizados en Italia una alta adecuación para esta finalidad productiva (Nardin y Alasia, 2004; Mareschi *et al.*, 2005).

Igualmente, la caracterización de clones pertenecientes a especies autóctonas del género (*P. alba*, *P. nigra* y *P. tremula*) deben ser exploradas para este tipo de aprovechamiento, a pesar de su peor aptitud para la propagación vegetativa, ya que muestran una elevada adaptación a crecer en altas densidades y también sobre terrenos marginales (Alba *et al.*, 2006) debido principalmente a la amplia variabilidad genética detectada en las poblaciones estudiadas (Alba, 2001; Sixto *et al.*, 2005).

Así mismo, a partir de un mayor conocimiento de las variables funcionales que están relacionadas con la producción se podrán conseguir avances significativos en la mejora y realizar una adecuada selección clonal para esta finalidad concreta (Al Afas *et al.*, 2005).

Espaciamientos y turnos de corta

Las plantaciones realizadas en altas densidades y turnos cortos han tenido a lo largo de los años diferentes intereses productivos. Inicialmente el interés se centró en la producción de fibra para uso papelerero o de tableros, sin embargo a partir de la primera crisis energética se contempló también la posibilidad de su utilización como posible fuente de energía alternativa.

Han sido numerosos los espaciamientos ensayados en parcelas experimentales de estos cultivos con el objetivo de incrementar los rendimientos productivos y encontrar la densidad óptima para un ciclo de producción y especie determinada. Así se ha probado desde densidades bajas en torno a 1.000 pies ha⁻¹ hasta los 310.000 pies ha⁻¹ (DeBell *et al.*, 1993). Conjuntamente con la densidad de plantación también se han ensayado diferentes turnos corta, desde turnos anuales hasta turnos próximos a los habituales para estas especies de crecimiento rápido (unos 14 años), con el fin de optimizar el cultivo y su aprovechamiento (p. ej. Willebrad *et al.*, 1993; Proe *et al.*, 2002).

Los tres efectos que parecen influir de forma significativa en la decisión de los diseños de las plantaciones y el manejo de los cultivos forestales energéticos son las siguientes:

i) La ley de producción constante final (Kira *et al.*, 1953), en la que se postula que el rendimiento de biomasa se incrementa con la densidad, si bien a partir de una densidad determinada la producción se hace independiente de la misma, lo cual podría utilizarse para determinar el número máximo de estaquillas por hectárea en plantaciones SRF.

ii) Se establece una competencia entre individuos con la presencia de árboles dominantes y dominados. El tiempo de corta deberá establecerse sobre estos estados de competencia, para evitar la disminución de la viabilidad de la cepa (Koyama y Kira, 1956; Weiner y Thomas, 1986).

iii) Según la ley de autoaclareo de Yoda *et al.* (1963) la biomasa total por unidad incrementa exponencialmente sin mortalidad hasta el cierre de copa. Después del cierre de las copas las plantas detendrán

su crecimiento si la densidad no se reduce. El espaciamiento y el turno de corta deben equilibrarse para evitar pérdidas por competencia dentro de cepa y la masa. Además de estas dos variables, deben considerarse otras como la duración de la plantación, mortalidad, posibles pudriciones y costes.

Son muchos los trabajos realizados en Europa y Norte América sobre la elección del turno más adecuado para el cultivo con clones de *Populus* y *Salix* (p. ej. Willebrandt y Verwijst, 1996; Proe *et al.*, 2002). El turno óptimo está determinado, en parte, por la producción de biomasa máxima alcanzada en ese periodo de tiempo. Este valor máximo se alcanza cuando el incremento de biomasa anual medio es igual al incremento anual corriente. Para una determinada densidad inicial existe un turno óptimo en el cual se aprovechan al máximo los recursos del suelo, acortándose el turno cuando las densidades iniciales sean altas. Sin embargo, esto no implica que siempre el turno más corto vaya a ser el mejor; ya que el mejor turno será aquel para el cual la planta consiga aprovechar todos los recursos de medio de forma óptima y a partir del cual se produzca un decaimiento de la producción. Armstrong *et al.* (1999) observaron que para densidades de 1.000 pies ha⁻¹ se obtenían mejores resultados de producción en turnos de 4 años, en vez de en dos rotaciones de dos años cada una; sin embargo, en experiencias con densidades mucho mayores (Bullard *et al.*, 2002) sí observaron que el turno más corto era el que mayores producciones ofrecía, debido a la plena utilización de los recursos del suelo.

No obstante, otros muchos factores pueden condicionar la densidad óptima y la longitud del turno más adecuada que deberá elegirse en cada caso concreto. Entre estos factores está la disponibilidad de maquinaria capaz de realizar el aprovechamiento a partir de un determinado grosor, los costos derivados de la corta considerados en los estudios de rentabilidad de la plantación, la conveniencia de obtener beneficios en plazos breves (sobre todo en plantaciones provenientes de antiguos cultivos agrarios acostumbrados a recoger beneficios anualmente), las fluctuaciones en demanda de madera por parte del sector energético, etc. En este sentido Bonari *et al.* (2004) en ensayos de turnos de corta de 1, 2 y 3 años en Italia consideraron que si bien en términos de producción de biomasa el turno de tres años era más conveniente, los diámetros obtenidos eran excesivos para la maquinaria de corta empleada, de tal forma que en la actualidad es el turno de dos años el habitualmente empleado.

Pero aunque la información de ensayos realizados sobre densidades y turnos óptimos para especies y clones es abundante, ésta es en muchos casos poco coincidente. Willebrandt y Verwijst (1996) citan incrementos en la producción a medida que se aumenta la densidad hasta alcanzar los 20.000 pies ha⁻¹ para sauce, si bien ésta se atenuó en rotaciones progresivas. Ensayos con *P. deltoides* en alta densidad (40.000 pies ha⁻¹) a turnos de corta de 4 años proporcionaron el doble de producción que la obtenida con densidades de 1.100 pies ha⁻¹, para 10 años de turno en zonas marginales de la India (Singh y Behl, 2001). Otros autores han recomendado disminuir la densidad de plantación hasta situarla en torno a 1.400 pies ha⁻¹ y eliminar el recepe como método de regeneración de la masa (Tuskan, 1998) reinstalando la plantación a partir de nuevas estaquillas (Stanturf *et al.*, 2001).

En plantaciones densas se reduce el tamaño del árbol medio, incrementándose la producción por unidad de superficie, al menos en pequeñas escalas de tiempo, debido a un cierre rápido de las copas y la ocupación total del espacio. Se obtienen además otros beneficios como el incremento del porcentaje de madera en relación con la biomasa total. A mayores densidades, el número de ramas y hojas es menor, por lo que el porcentaje de biomasa leñosa aprovechable aumenta (Ciria *et al.*, 2002) además de contribuir la mayor densidad a disminuir la competencia de las malas hierbas (Bergkvist y Ledin, 1998), pero una vez que se han cerrado las copas, se encuentran pocas diferencias en la producción en comparación con otras plantaciones realizadas con espaciamientos más amplios. También hay que reseñar inconvenientes a las plantaciones de alta densidad, tales como un incremento en el porcentaje de corteza, resinas y otros componentes químicos de la biomasa que pueden ser no deseables para su aprovechamiento energético posterior (Kauter *et al.*, 2003). Además de esto habría que añadir un incremento de coste de establecimiento.

Bullard *et al.* (2002) comparando plantaciones de sauces con densidades que oscilaron entre los 10.000 y los 111.000 pies ha⁻¹ no obtuvieron una densidad a partir de la cual la producción comenzara a decrecer. Citan, sin embargo, incrementos de producción del orden del 34% entre las densidades más altas y las más bajas. Las mayores producciones se obtuvieron en rotaciones de dos años y para las mayores densidades, sin embargo, teniendo en cuenta consideraciones de tipo económico, las combinaciones óptimas rotación/densidad inicial fueron finalmente de 15.625 pies

ha⁻¹. Igualmente se han obtenido buenos resultados con variedades de chopo seleccionadas en Italia para SRC aplicando cortas cada 2 años, con producciones medias en torno a las 20 t MS ha⁻¹ año⁻¹, si bien se remarca la necesidad de llevar a cabo una mayor experimentación para determinar para cada clon o especie el óptimo de densidad de plantación y por tanto el turno a aplicar (Mareschi *et al.*, 2005).

Son diversas las referencias que aluden a mayores producciones en la segunda rotación y sucesivas frente a la primera corta (Willebrand y Verwijst, 1996; Kopp *et al.*, 2001) debido al aumento del número de brotes por cepa y, sobre todo, a que las cepas ya tienen un sistema radical desarrollado y alcanzan el cierre de las copas con más rapidez con lo que se consigue un control más eficaz de la competencia herbácea y por tanto un aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles para el desarrollo de la plantación. Por ello, es posible plantear la conveniencia de realizar una corta el primer año, como método de establecimiento del tallar, buscando una mayor producción de brotes sustentados por un sistema radicular ya instalado (p. ej. Macpherson, 1995; Laureysens *et al.*, 2004). Al mismo tiempo esta corta inicial permite llevar a cabo una intervención más eficaz en el control de las hierbas en el caso de plantaciones deficientemente instaladas (Macpherson, 1995) y puede suponer además una fuente de suministro de material clonal para plantaciones sucesivas en el tiempo. En contraposición, esta práctica puede suponer un coste adicional al cultivo, que puede no estar justificado por la cantidad de biomasa producida, o bien no proporcionar múltiples brotes vigorosos motivado por la fuerte dominancia apical que muestran algunos clones de chopo, o incluso, hacer necesaria una segunda aplicación de herbicida. En este caso el propietario tendrá su inversión retenida durante un año más. La decisión final a adoptar dependerá de un conjunto de factores que tienen mucho que ver con el nivel de satisfacción en el establecimiento del ensayo.

Son igualmente frecuentes los estudios (p. ej. Armstrong *et al.*, 1999; Proe *et al.*, 2002; Kauter *et al.*, 2003) que señalan la importancia del espaciamiento y de la interacción del espaciamiento/genotipo sobre la mortalidad de las cepas, la cual se atribuye a la excesiva competencia que aparece en espaciamientos tan pequeños. Por tanto, el espaciamiento, edad de rotación y supervivencia están estrechamente ligados. En espaciamientos muy cortos el cierre de las copas y la utilización completa del sitio ocurre antes, creándose una

estrecha competencia y altas tasas de mortalidad entre las cepas frente a lo que sucede en plantaciones menos densas.

En relación a las plantaciones con múltiples clones, Willebrand *et al.* (1993) concluyen que en la mezcla de clones de chopo en turnos de corta de 1-4 años se obtiene un mayor rendimiento que en las masas puras, debido a que los clones más vigorosos responden mejor en masas mixtas y pueden ocupar los huecos que dejan los individuos que han sufrido pérdida de vitalidad por la competencia u otras causas. Sin embargo, en estas plantaciones multiclonales los clones que posean menor crecimiento inicial pueden sufrir mucho en los primeros momentos e incluso llegar a ser suprimidos por aquellos que son más vigorosos, por lo que a la hora de diseñar las mezclas se debe tener muy en cuenta el patrón de crecimiento inicial de los mismos.

Una de las preguntas habituales que se formulan en la literatura analizada es sobre el tiempo de duración de una cepa en buenas condiciones para producir, habida cuenta que muchas de las plantaciones en estudio no han alcanzado un número elevado de recepes. Sin embargo, esta cuestión general no tendrá una respuesta concreta, ya que el genotipo y su interacción con el sitio y con las prácticas culturales aplicadas pueden condicionar la vida útil de la cepa de una especie o clon particular.

La tendencia actual apunta a la aplicación de turnos reducidos y a la realización de una gestión más intensiva, avalado por los diferentes trabajos en los que se ha constatado aumentos en la producción al reducir los turnos de corta y al aumentar la densidad, así como por el resto de factores ya referidos. Sin embargo aún son muchos los interrogantes sobre los turnos y espaciamientos óptimos para un determinado clon o especie plantados en un sitio determinado. Se requiere de un mayor esfuerzo en la investigación para la determinación del incremento máximo anual en biomasa por especie y condiciones ecológicas (clima y suelo) ya que solo de esta forma se podrán determinar los turnos y espaciamientos óptimos para cada condición.

Tratamientos culturales

Control de malas hierbas

El control de la vegetación herbácea en la instalación de plantaciones del género *Populus* a partir de estaquillas, es una práctica imprescindible para su ade-

cuado cultivo. Ello es debido, no solo a la merma que esta vegetación acarrea en el crecimiento, al reducir la disponibilidad de agua y nutrientes para los chopos, sino también a la intensa competencia que se establece con las estaquillas por el espacio y la luz, pudiendo llegar a ahogar literalmente a la plantación (Willoughby y Clay, 1996; Sixto *et al.*, 2001; Kauter *et al.*, 2003).

Este manejo, necesariamente intensivo durante el primer periodo vegetativo en las plantaciones de turno corto, es esencial que se inicie durante la fase de preparación del terreno, principalmente cuando se detecta la presencia de especies perennes que pueden resultar de difícil control posterior, recurriendo a la aplicación de herbicidas adecuados y/o al empleo de técnicas de laboreo que garanticen su control (Tubby y Armstrong, 2002). Un control inadecuado de la vegetación preexistente en las operaciones de preparación del terreno conduce, cuanto menos, a una implantación deficiente.

Tras la instalación de la plantación, la aplicación de herbicidas residuales resulta ser el método más eficiente para combatir la presencia de malas hierbas, ya que otros métodos de control, tales como el empleo de labores intercalares mecánicas, resulta menos eficaz al no permitir la eliminación de la hierba en la zona cercana al árbol (García-Baudín y Montero, 1996), obligando con ello a recurrir a una escarda manual, claramente antieconómica.

Si bien no es abundante la información publicada sobre tolerancia a herbicidas en árboles caducifolios, son diversas las materias activas que se han mostrado adecuadas para ser utilizadas inmediatamente antes de la brotación en estas especies. La elección del producto más adecuado dependerá de diversos factores como las especies a controlar y las características de suelo y clima. En EE.UU. son diversas las materias activas que se han utilizado para su empleo en este tipo de plantaciones. Stanturf *et al.* (2001) presentan una relación de herbicidas susceptibles de ser utilizados en SRF en Norte América. En Inglaterra, para esta misma finalidad, se han recogido en un manual específico (Willoughby y Clay, 1996) las materias activas que pueden ser utilizadas. En post-plantación se han obtenido buenos resultados con fluzifop, cicloxidim o propaquizafop para el control de gramíneas y clopiralida para compuestas (Tubby y Armstrong, 2002). En Argentina simazina y quizalofop-p-etil se han utilizado con éxito en el establecimiento de las plantaciones en alta densidad (Achinelli *et al.*, 2001) y en Italia se citan buenos resultados con la aplicación de alacloro, me-

tolacloro y pendimetalina en el control de gramíneas (Giorcelli y Vietto, 1996), fenmedifam, oxifluorfen, diclofop-metil y setoxidim en el control de diferentes especies dicotiledóneas y monocotiledóneas (Facciotto y Mughini, 2003) o linuron en preemergencia y piridato y fluzifop-p-butil en post-emergencia (Balsari y Airolti, 2002).

En la actualidad, las materias activas con acción herbicida autorizadas para ser utilizadas en nuestro país y aplicables al chopo son solamente tres: oxifluorfen, glifosato y glufosinato de amonio (MAPA, 2006). El primero de ellos, controla un amplio abanico de dicotiledóneas y de monocotiledóneas mientras que los dos restantes no son selectivos.

La aplicación de tratamientos durante el segundo o tercer periodo vegetativo resulta más cuestionable, ya que si bien se han observado mejoras significativas en el crecimiento bajo determinadas condiciones de sitio, densidad de plantación y prácticas de cultivo (Buhler *et al.*, 1998), en otros casos estas intervenciones han mostrado no ser necesarias (Sixto *et al.*, 2001) debido a un rápido cierre de las copas de los árboles que controló de forma eficaz la proliferación de herbáceas. Esto implica, en general, una utilización de herbicidas inferior al requerido para el desarrollo de cultivos anuales (Karacic, 2005).

Después de realizar la corta, puede ser nuevamente necesaria la aplicación de herbicidas con el fin de facilitar la instalación de los nuevos rebrotes. Esta aplicación debe realizarse con anterioridad a la brotación de las yemas tanto si se utiliza un herbicida en post-emergencia, total y no translocable, como el glufosinato de amonio, como si se utiliza en preemergencia la materia activa oxifluorfen, con acción residual entre 3 y 6 meses. Si los problemas persisten más allá de este estado, puede recurrirse a la escarda mecánica o a realizar aplicaciones dirigidas con la materia activa glifosato, si bien teniendo en cuenta siempre que se trata de un herbicida total y translocable. En cualquier caso es necesaria una valoración correcta del umbral de daño, lo que sin duda racionaliza el empleo de estos productos.

En la actualidad, técnicas de ingeniería genética están permitiendo la inserción de genes de resistencia y/o tolerancia a herbicidas en muchas especies, entre ellas el chopo (Confalonieri *et al.*, 2000; Gullner *et al.*, 2001) considerada como especie piloto en el ámbito forestal debido a la facilidad de manipulación que permite su pequeño genoma, al hecho de exhibir madurez sexual precoz, así como de mostrar un crecimen-

to rápido. En Estados Unidos, país pionero en el desarrollo de transgénicos, se cuenta ya con resultados de campo de árboles tolerantes a glifosato, habiéndose enfatizado en el desarrollo de la ingeniería genética de chopos para cultivo en turnos cortos (Meilan *et al.*, 2000).

El control de las malas hierbas resulta por tanto determinante para el correcto establecimiento de la plantación y para su desarrollo posterior hasta el cierre de las copas. El escaso número de herbicidas disponibles para ser utilizados en este tipo de plantaciones obliga a tener presente estrategias de lucha integrada, en donde la adecuación en la preparación del sitio de plantación y la combinación de métodos químicos y mecánicos permitan el correcto manejo. Un control inadecuado puede acarrear una alta mortalidad de pies así como provocar reducciones en la producción superiores al 50% (Buhler *et al.*, 1998).

Fertilización

El grado de fertilidad del suelo condiciona de manera importante la producción en biomasa, ya que constituye el principal suministro de nutrientes para la planta. Con relación al chopo, se consideran suelos de aceptable fertilidad aquellos cuyos contenidos en N:P:K asimilables se sitúan en torno a 5, 30 y 100 ppm, respectivamente (Domínguez, 1997). Los efectos que provoca la fertilización sobre la producción en cho-peras destinadas a madera de desarrollo han sido ampliamente estudiados y, sin embargo aun no están suficientemente claros, considerándose uno de los tratamientos culturales más controvertidos (Sixto *et al.*, 2007).

En la bibliografía existe controversia sobre la práctica de fertilizar o no fertilizar las plantaciones SRF. Así, por ejemplo, Heilman y Xie (1994) no encontraron diferencias al comparar las producciones de varios clones de chopos tras la aplicación de distintas dosis de fertilizante. Tampoco se han apreciado diferencias en las producciones de plantaciones sometidas a distintos espaciamientos y dosis de fertilizante (Strong y Hansen, 1993), o entre parcelas fertilizadas y otras testigo, recepadas o no (Ceulemanns y Deraedt, 1999). Geyer y Melichar (1986) no encontraron evidencias de que fertilizaciones simples y múltiples, con aplicaciones de nitrógeno a razón de 200 kg ha⁻¹ durante un año, afectaran significativamente a la producción de biomasa. Por su parte, Kopp *et al.* (2001) informaron

que la fertilización no incrementó la producción máxima en cinco clones de sauces y un híbrido de chopo, produciéndose además una mortalidad significativamente mayor en las parcelas fertilizadas. La misma falta de respuesta o de incremento de la producción fue encontrada por Schol y Ellerbrock (2002) en Japón al aplicar diferentes niveles de fertilización (entre 0 y 150 kg N ha⁻¹), aportada a través de madera triturada, cenizas o fertilizantes minerales, en plantaciones realizadas con el clon Japón 105 (*P. maximowizii* × *P. nigra*). En ciertos casos, esta ausencia de respuesta puede ser en parte atribuida a un adecuado grado de fertilidad del suelo antes de realizar la plantación, ya que frecuentemente se realizan en terrenos abandonados de la agricultura.

Pero también se encuentran en la bibliografía respuestas positivas a la fertilización. Por ejemplo, Coleman *et al.* (2006), citan incrementos en la producción entre un 43 y un 82% en varios clones híbridos de chopo después de 3 aplicaciones anuales de urea o de un abono complejo, mostrándose el N como el elemento limitante más importante, independientemente del tipo de fertilizante aplicado. La respuesta a la fertilización fue además positiva para todos los sitios de ensayo analizados. Se constató también que la fertilización incrementaba el área foliar, la producción de hojarasca, el área de la cubierta de copas y el contenido en N de las hojas. La producción se incrementaba a medida que aumentaba el contenido en N interno y múltiples aplicaciones a dosis inferiores resultaban más efectivas que una aplicación única con una dosis mayor. Van Veen *et al.* (1981) y Stanfurf *et al.* (2001) hablan de necesidades N de 120 y 50-100 kg ha⁻¹ año⁻¹, para plantaciones SRF en Europa y América del Norte respectivamente.

La asociación italiana para la biomasa (Itabia, 2006) cita en su guía de producción en SRF, la conveniencia, en función de las características locales, de incorporar al terreno fertilizantes orgánicos antes del establecimiento de la plantación y siempre mediante la utilización de compuestos que no acarreen riesgos medioambientales. Alternativamente, se podrían emplear abonos minerales. Igualmente se sugiere la conveniencia de repetir la fertilización tras la corta y antes de que se produzca la nueva brotación en cada ciclo de cultivo.

Se considera que los aportes del desfronde al final del periodo vegetativo puede contribuir a la recirculación de nutrientes, debido a que el contenido acumulado en las hojas es comparativamente superior al acumulado en el fuste de los árboles (Rytter, 2002). No

obstante, en cualquier momento del cultivo se pueden presentar síntomas de deficiencias en algún nutriente que será preciso analizar para su posterior corrección.

A la fertilización tradicional, se unen en los últimos años los estudios en los que se analiza la posibilidad de utilizar una fertilización alternativa a través del empleo de aguas residuales, lodos procedentes de granjas, biosólidos, etc., habiéndose obtenido en muchos casos resultados positivos en la mejora de la productividad de las plantaciones SRF (Heaton, 2000).

En cualquier caso, conseguir una alta eficacia en la aplicación de fertilización aconsejará realizar una evaluación del sitio, así como considerar el efecto que pueden provocar otros tratamientos aplicados. En este sentido, diferencias en las condiciones de suelo en cuanto a textura, contenido en nutrientes y abundancia del banco de semillas de malas hierbas han condicionado significativamente la respuesta a la fertilización aplicada (Barrio *et al.*, 2007). Igualmente, hay que tener en cuenta que la aplicación de fertilización puede acarrear un coste energético que debe ser valorado, tanto desde el punto de vista financiero como medioambiental. Asimismo, en el plano energético, es de gran interés optimizar la utilización de labores y fertilizantes, ya que el 47% de los insumos energéticos utilizados en la producción de la biomasa puede atribuirse a los tratamientos culturales aplicados y, concretamente un 37% a los tratamientos de fertilización (Balsari y Airoldi, 2002).

Control de plagas y enfermedades

La presencia de plagas o enfermedades que provoquen principalmente pérdidas de follaje y en un segundo lugar perforaciones en la madera, pueden repercutir negativamente en la producción de biomasa, por lo que constituyen una de las principales preocupaciones en las plantaciones energéticas de chopo.

En Europa, el principal problema ocasionado por hongos fitopatógenos lo constituyen las diversas especies del género *Melampsora* sp., conocidas genéricamente como royas, como *M. larici-populina* Kleb, *M. medusae* Thum o *M. alli-populina* Kleb (Anselmi *et al.*, 2006). Su presencia se hace notoria por la aparición de punteaduras amarillo-anaranjadas mayoritariamente en el envés de las hojas.

Debido a los problemas de pérdida de productividad que provocaban, clones como 'Boelare' o 'Beaupre', altamente sensibles, han sido sustituidos por otros

resistentes como 'Hazendans' o 'Hoogvorst' (Lonsdale y Tabbush, 1998). En la actualidad gran parte de los esfuerzos en la mejora se concentran en la búsqueda de material resistente a las nuevas razas de roya que sucesivamente aparecen, así como en conocer la base genética de estas resistencias, siendo frecuente que clones resistentes a una raza sean susceptibles a la siguiente (Dowkiw *et al.*, 2003; Pei *et al.*, 2005). Igualmente se tiende a favorecer como estrategia de control, la mayor diversidad genética del material que se emplea en las plantaciones (Lonsdale y Tabbush, 1998).

En España las condiciones ambientales y las prácticas de cultivo llevadas a cabo hasta ahora, no han favorecido la presencia de estas patologías de manera tan significativa como se ha citado en el resto de Europa, si bien en Cataluña algunos clones con alta susceptibilidad a *Melampsora* sp. tuvieron que ser desestimados para su utilización en populicultura intensiva (Camps *et al.*, 1999).

Otros defoladores que pueden producir pérdidas de producción son *Venturia populina* (Vuill.) Fabricius y *Marsonnina brunnea* (Ell. et Ev.) P. Magn, provocando el primero de ellos la aparición de brotes secos y ennegrecidos así como hojas agarrotadas y negruzcas. El segundo se manifiesta inicialmente sobre las hojas bajas en forma de punteaduras marrones menores de 1 mm y rodeadas de una capa mucilaginoso. En los troncos es posible encontrar otros patógenos como *Dothichiza populea* o *Cytospora chrysosperma*, provocando ambas manchas pardas sobre la corteza (Soria, 1992).

Entre los insectos *Melasma populi* L., *Leucoma salicis* L., *Lymantria dispar* L. o *Dicranura iberica* L. pueden ocasionar defoliaciones que conlleven una pérdida significativa de producción. En Europa se han citado, también, como importantes diferentes especies del género *Phyllodecta* (DEFRA, 2002).

La presencia de perforadores como *Saperda carcharias* L. o *Paranthrene tabaniformis* Rott. pueden provocar galerías que pueden reducir la cantidad de madera producida o comprometer la viabilidad futura del tocón.

La respuesta clonal en relación a la tolerancia o resistencia a plagas y enfermedades debe ser igualmente un factor a considerar por el importante impacto que puede ocasionar sobre la producción y por su efecto negativo en la sostenibilidad del cultivo (Nordman *et al.*, 2005). Los métodos preventivos, entre los que se encuentra la utilización de material tolerante, se han

mostrado muy eficaz en el control de enfermedades y plagas. La aplicación de tratamientos fitosanitarios para resolver problemas fitopatológicos debe en cualquier caso tener como referente la legislación vigente y aplicarse como respuesta a un problema específico cuando se alcance un umbral de daños no tolerable y no tanto, como programas generales de tratamiento preventivo.

Otro tipo de riesgo que es necesario comentar es la alta palatabilidad del chopo para un importante número de mamíferos (ciervos, liebres, conejos, ratones, etc.), lo que puede implicar la necesidad de vallado de la plantación en las zonas de alto riesgo, fundamentalmente durante el establecimiento, cuando los brotes son aún tiernos.

Riegos

En general, las especies e híbridos del género *Populus* se caracterizan por su marcada higrofilia, estimándose que absorben entre 6 y 7 cm³ de agua al día por gramo de materia seca formada (Padró y Oresanz, 1987). En nuestras condiciones climáticas, el cultivo del chopo en alta densidad y turnos cortos requiere por tanto de la aplicación de riegos regulares durante buena parte del periodo vegetativo.

Los sistemas de riego empleados son muy variados, siendo habitual el riego por gravedad (a manta, por regueras, etc.), por aspersión y, cada vez más, mediante goteo tratando de optimizar la eficiencia del riego. Los caudales necesarios dependerán en principio de las características de la estación (suelo, precipitación, insolación, temperatura y viento), así como del sistema de riego empleado. La información relativa a las necesidades de riego en SRF es escasa, ya que en buena parte de los países en los que se practica, la aplicación de riegos no es necesaria, o se utiliza solo de forma puntual. Sin embargo, si existen referencias a las necesidades de riego en viveros, cuya densidad de plantación y turno es bastante similar a las plantaciones en SRF (Frison, 1982; Zivanow *et al.*, 1985)

En España, en plantaciones para madera de desarrollo en Castilla-León, se considera que los caudales mínimos necesarios se sitúan en torno a 2.000-4.000 m³ ha⁻¹ por temporada (González-Antoñanzas, 1983), si bien en Aragón y La Rioja, los caudales óptimos se sitúan entre los 4.000 y 6.000 m³ ha⁻¹ (Padró y Oresanz, 1987; Garavilla, 2004). En cualquier caso, es deseable que la cantidad de agua a aplicar se calcule en

función de la evapotranspiración potencial (ETP) y del coeficiente del cultivo, procurando así una mayor eficiencia en el uso del agua. Aplicar caudales superiores a los necesarios no suponen ventajas en la producción (Sixto *et al.*, 2001), habiéndose constatado que, en general, la aplicación de riegos en cultivos sobrepasa en más del 20% las necesidades de agua reales (Álvarez *et al.*, 2000). Por otro lado, la aplicación de riego por debajo de las necesidades se reflejan no solo en una menor producción de biomasa total (Yin *et al.*, 2005), sino que puede provocar en la planta una situación de especial vulnerabilidad frente al ataque de determinadas plagas y enfermedades. Por tanto, se considera prioritario en nuestras condiciones de cultivo, el tener en cuenta criterios funcionales relacionados con la eficiencia intrínseca en el uso del agua en la selección de los clones a emplear en plantaciones para la producción de biomasa en turnos cortos (Sixto *et al.* 2007).

Consideraciones generales

Las plantaciones de chopo en altas densidades y turnos cortos (SRF) destinadas a la producción de biomasa energética, son de momento en nuestro país, tan solo experimentales, si bien se están dando los primeros pasos para que este sistema de producción se haga sitio en el mercado.

A pesar de la adecuación del género para este sistema productivo, firmemente avalada por la múltiple información existente (Tabla 1), y de que existen terrenos agrarios excedentarios y conocimientos prácticos suficientes para poderlos llevar a cabo, la rentabilidad económica, desde el punto de vista agronómico, sigue estando en buena medida condicionada por conseguir incrementos en la producción. Ello implica encontrar los genotipos más idóneos para un determinado ambiente, adecuar los espaciamientos y turnos, e incidir en la optimización de las prácticas de manejo aplicadas a las plantaciones.

La necesidad de investigación en estas plantaciones se concreta por tanto en: (i) obtener materiales que adaptados a un determinado ambiente sean capaces de producir una mayor cantidad de biomasa, lo que supondría mejorar la eficiencia en el uso del agua, del nitrógeno y de la radiación solar; (ii) entender el papel de la arquitectura de la planta en el comportamiento fisiológico y su relación con la producción, así como su incidencia sobre las tareas de recolección; (iii) adecuar los espaciamientos y turnos a las características

del material a utilizar; (iv) optimizar los sistemas de riego; (v) desarrollar sistemas de manejo integrado de malas hierbas adecuados al cultivo; (vi) valorar la aptitud de la especie al recepe; (vii) considerar el potencial de la ingeniería genética sobre la tolerancia a estrés bióticos y abióticos; (viii) o implementar modelos de estimación de biomasa. Por otra parte, la utilización energética de la biomasa de chopo requiere además de desarrollos adicionales: (ix) sistemas de recogida y almacenaje (x) desarrollo de biocombustibles de características adecuadas a los requerimientos de los equipos energéticos en los que se vaya a utilizar la biomasa.

Agradecimientos

Este trabajo se encuadra dentro de los proyectos PSE6-2005- Cultivos energéticos, financiado por el MEyC y RTA 00182.02, de financiación INIA.

Referencias bibliográficas

- ACHINELLI F.G., ACCIARESI H.A., MARLATS R.M., 2001. Leaf characteristics, light interception and productivity of newly planted *Populus deltoides* cuttings under different integrated weed control schedules in an ex-agricultural site in Buenos Aires Province, Argentina. Proceedings of an International British Crop Conference. pp. 3005-3008.
- AL AFAS N., PELLIS A., NIINEMENTS U., CEULEMANS R., 2005. Growth and Production of a short rotation coppice culture of poplar II. Biomass and Bioenergy 28(6), 536-547.
- ALBA N., 2001. Variabilidad genética de *P. alba* L. mediante caracteres isoenzimáticos y fenotípicos: aplicación a la selección y conservación de recursos genéticos. Tesis Doctoral. ETSIM, Madrid. 144 pp. (inédita).
- ALBA N., GODOY N., SIXTO H., 2006. Growth and potential production of different *Populus alba* l. clones for biomass. 15th European Biomass Conference and Exhibition. Berlín. pp. 728-729.
- ÁLVAREZ R., ONCINS J.A., CUERVA J., MARAVER A., JIMÉNEZ M., COHEN M., 2000. Método de diagnóstico a tiempo real del estado hídrico. V Symposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas. Alcalá de Henares. pp. 233-238.
- ANSELMINI N., MAZZAGLIA A., GIORCELLI A., 2006. Enfermedades de Salicáceas. Actas Jornadas de Salicáceas. Universidad de Buenos Aires 1, 46-60.
- ARMSTRONG A., JOHNS C., TUBBY I., 1999. Effect of spacing and cutting cycle on the grown as an energy crop. Biomass and Bioenergy 17, 305-314.
- ARSIA (Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'innovazione nel settore agricolo-forestale), 2004. Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy Farm. Quaderno n° 6, 159 pp.
- BALSARI P., AIROLDI G., 2002. Valutazione energetica ed economica di una coltivazione di pioppo per la produzione di biomasa. Riv Agron 26, 163-169.
- BARRIO M., MONTOTO J.L., PÉREZ J., MAZÓN P., CIRIA P., SIXTO H., 2007. Influence of fertilization and weed control following the first growth period in multi-clonal poplar plantations in central Spain. 15th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin. pp. 736-740.
- BENBRAHIM M., GAVALAND A., GAUVIN J., 2000. Growth and yield of mixed polyclonal stands of *Populus* in short-rotation coppice. Scand J For Res 15, 605-610.
- BERGKVIST P., LEDIN S., 1998. Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems. Biomass and Bioenergy 14(2), 149-156.
- BEWA H., GAVALAND A., 1999. The INRA Short Rotation Coppice programme. Biobase B10239.
- BONARI E., PICCHI G., GINANNI M., FRAGA A., GUIDI W., 2004. Poplar short rotation coppice behaviour under different harvesting treatments. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Roma. pp. 237-239.
- BUHLER D., NETER D., RIEMENSCHNEIDER E., HARTLER R., 1998. Weed management in short rotation poplar and herbaceous perennial crops grown for biofuel production. Biomass and Bioenergy 14(4), 385-394.
- BULLARD M.J., MUSTILL S.J., MCMILLAN S.D., NIXON P.M., 2002. Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp.: 2. Resource capture and use in two morphologically diverse varieties. Biomass and Bioenergy 22(1), 27-39.
- BUNN S.M., RAE A.M., HERBERT C.S., TAYLOR G., 2004. Leaf-level productivity traits in *Populus* growth in short rotation coppice for biomass energy. Forestry Oxford 77(4), 307-323.
- CAMPS F., LORENTE I., BARROSO M., 1999. Incidencia de la roya del chopo (*Melampsora* spp) en Cataluña. III Reunión del Grupo de Trabajo de Populicultura. Actas de la reunión. Tudela.
- CANDILO M.D., RANALLI P., CESARETTI C., PASINI., 2004. Non-food crops: their use to provide energy now a reality. Informatore Agrario 60(1), 34-38.
- CEULEMANS R., McDONALDS A.J.S., PEREIRA J.R., 1996. A comparison among eucalypt, poplar and willow characteristics with particular reference to a coppice, growth-modelling approach. Biomass and Bioenergy 11(2/3), 215-231.
- CEULEMANS R., DERAEDT W., 1999. Production physiology and growth potential of poplars under short rotation forestry culture. Forest Ecology and Management 121, 9-24.
- CHATURVEDI A.N., 1998. Plantations as a source of industrial raw material for wood-based industry. En: Damodaran K., Aswathanarayana B.S., Prasad T.R.N., Hy-

- masundar K., Padmanabhan S., eds. Proceedings of national seminar on processing and utilization of plantation timber and bamboo, Bangalore, India. pp. 13-19.
- CHRISTIAN D.P., NIEMI G.J., HANOWSKI J.M., COLLINS P., 1994. Perspectives on biomass energy tree plantations and changes in habitat for biological organisms. *Biomass and Bioenergy* 6, 31-39.
- CHRISTERSSON L., VERMA K., 2005. Short rotation forestry- a complement to conventional forestry. FAO. Unasylva 223.
- CIRIA M.P., GONZÁLEZ E., MAZÓN P., CARRASCO J.E., 1996. Influence of the rotation age and plant density on the composition and quality of poplar biomass. *Biomass for energy and the environment. 9th European Bioenergy Conference & 1st European Energy from biomass technology exhibition. Vol II*, pp. 968-973.
- CIRIA M.P., 1998. Efecto del turno de corta y de la densidad de plantación sobre la productividad de diversos clones de chopo en condiciones de corta rotación. Tesis doctoral. ETSIA, Universidad Politécnica de Madrid. 245 pp.
- CIRIA M.P., GONZÁLEZ E., CARRASCO J.E., 2002. The effect of fertilization and planting density on biomass productivity of poplar harvested after three-years rotation. *12th European Conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection. Vol I*, pp. 283-286.
- COLEMAN M., TOLSTED D., NICHOLS T., JOHNSON W.D., WENE E.G., HOUGHTALING T., 2006. Post-establishment fertilization of Minnesota hybrid poplar plantations. *Biomass and Bioenergy* 30(8/9), 740-749.
- CONFALONIERI M., BELENGHI B., BALESTRAZZIA., NEGRI S., FACCIOTTO G., SCHENONE G., DELLEDONNE M., 2000. Transformation of elite white poplar (*Populus alba* L.) cv. 'Villafranca' and evaluation of herbicide resistance. *Plant Cell Report* 19, 10.
- DeBELL D.S., CLENDENEN G.W., ZASADA J.C., 1993. Growing *Populus* biomass: comparison of woodgrass wider-spaced short rotation systems. *Biomass and Bioenergy* 4(5), 305-313.
- DeBELL D.S., HARRINGTON C.A., 1993. Deploying genotypes in short-rotation plantations: mixtures and pure cultures of clones and species. *The Forestry Chronicle* 69, 705-713.
- DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs), 2002. Growing short rotation coppice. Ed. Defra Publications, London. 36 pp.
- DERAEDT W., CEULEMANS R., 1998. Clonal variability in biomass production and conversion efficiency of poplar during the establishment year of a short rotation coppice plantation. *Biomass and Bioenergy* 15, 391-398.
- DÍAZ C., TANDUG L., 1999. Development and management of short-rotation forestry in the Philippines. En: Proceedings of a Joint Meeting at the University of Philippines.
- DOMÍNGUEZ A., 1997. Plantaciones Forestales. En: Tratado de Fertilización. Ediciones Mundi-Prensa. pp. 518-522.
- DOWKIW A., HUSSON C., FREY P., PINON J., BASTIEN C., 2003. Partial resistance to *Melampsora larici-populina* leaf rust in hybrid poplars: genetic variability in inoculated excised leaf disk bioassay and relationship with complete resistance. *Phytopathology* 93(4), 421-427.
- ECKENWALDER J.E., 1996. Systematic and evolution of *Populus*. En: *Biology of Populus and its implications for management and conservation* (Steller R.F., Bradshaw H.D., Heilman P.E., Hinckely T.M., eds). NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa. pp. 7-32.
- FACCIOTTO G., MUGHINI G., 2003. Modelli colturali e produttività della selvicoltura da biomassa. *L'Informatore agrario* 59, 95-98.
- FACCIOTTO G., BERGANTE S., LIOIA C., ROSSO L., MUGHINI G., ZENONE T., NERVO G., 2006. Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve. Sezione Speciale - Atti V Congresso SISEF: Foreste e Società Cambiamenti, Conflitti, Sinergie. 20 pp.
- FARMER RE., 1996. The genecology of *Populus*. En: *Biology of Populus and its implications for management and conservation* (Steller R.F., Bradshaw H.D., Heilman P.E., Hinckely T.M., eds). NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa. pp. 33-55.
- FRISON G., NEGRO G., BARDELLI P., 1982. Research on the water requirements of poplars in the nursery irrigated by sprinklers. *Cellulosa e Carta* 33, 10, 3-28.
- GARAVILLA V., 2004. Manual de cultivo de choperas en La Rioja. Gobierno de La Rioja. 52 pp.
- GARCÍA-BAUDIN J.M., MONTERO G., 1996. Control de malas hierbas en la reforestación de tierras agrícolas. *Vida Rural* 35, 54-56.
- GEYER W.A., MELICHAR M.W., 1986. Short-rotation forestry research in the United States. *Biomass* 9(2), 123-133.
- GIORCELLI A., VIETTO L., 1996. Fitotoxicità verso il pioppo di principi attivi diserbanti distribuiti in post-emergenza. *ATTI Giornate Fitopatologiche* 1, 405-412.
- GOEL V.L., BEHL H.M., 2004. Productivity assessment of three leguminous species under high-density plantations on degraded soil sites. *Biomass and Bioenergy* 27(5), 403-409.
- GONZÁLEZ-ANTOÑANZAS F., 1983. Aumento de la producción en las choperas. Resultados de doce años de un estudio comparativo de técnicas selvícolas. Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales 17, 38 pp.
- GULLNER G., KOMIVES T., RENNENBERG H., 2001. Enhanced tolerance of transgenic poplar plants overexpressing -glutamylcysteine synthetase towards chloroacetanilide herbicides. *Journal of Experimental Botany* 52(358), 971-979.
- HALL R.B., 1994. Use of the crown competition factor concept to select clones and spacing for short-rotation woody crops. *Tree Physiol* 14, 899-909.
- HEATON R.J., 2000. The silviculture, nutrition and economics of short rotation coppice in the uplands of Mid-Wales. PhD thesis, University of Wales.
- HEILMAN P.E., XIE F.G., 1994. Effects of nitrogen fertilization on leaf area, light interception, and productivity of

- short-rotation *Populus trichocarpa* × *Populus deltoides* hybrids. *Can J For Res* 24(1), 166-173.
- HOWE G.T., HACKETT W.P., FURNIER G.R., KLEVORN R.E., 1995. Photoperiodic response of a northern and southern ecotype of black cottonwood. *Physiologia Plantarum* 93, 695-708.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), 2004. Plan de Energías Renovables 2005-2010. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- ILSTEDT B., 1996. Breeding strategy for poplar in Sweden. *Forest Genetics* 3, 183-195.
- ISEBRAND J.G., KARNOSKY D.F., 2001. Environmental benefits of poplar culture. En: *Poplar culture in North America* (Dickmann D., Isebrand J.C., Eckenwalder J., Richarson J., eds). NRC Reseach Press, Ottawa. pp. 207-218.
- ITABIA, 2002. Forestry and agricultural energy sources. Annual Report. Italian Biomass Association, Roma. 10 pp.
- ITABIA, 2006. Poplar SRF production guide. Italian Biomass Association. Grafica snc, Roma. 22 pp.
- JOSSART J.M., GOOR F., NERINCKX X., LEDENT J-F., 1999. Le taillis à très courte rotation, alternative agricole. Laboratoire ECOP, Faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Belgique. 158 pp.
- KARACIC A., 2005. Production and ecological aspects of short rotation poplars in Sweden PhD. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 42 pp.
- KASSAHUN E., 2001. The potencial of bamboo as an interceptor and converter of solar energy into essential goods and services: focus on Etiopía. *Internat Journal of Sustainable Development and World Ecology* 8, 346-355.
- KAUTER D., 1999. Poplars for Short rotation forestry. An overview of the genus. Biobase B10529.
- KAUTER D., LEWANDOWSKI I., CLAUPEIN W., 2003. Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use- a review of the physiological basis and management influences. *Biomass and Bioenergy* 24(6), 411-427.
- KHAMZINA A., LAMERS J.P.A., WORBES M., BOTMAN E., VLEK P.L.G., 2006. Assessing the potencial of trees for afforestation of degraded landscapes in the Aral Sea Basin of Uzbekistan. *Agroforestry Systems* 66(29), 129-141.
- KIRA T., OGAWA H., SHINOZAKI K., 1953. Intraspecific competition among higher plants. 1. Competition-density-yield interrelationships in regularly dispersed populations. *J Inst Polytech Osaka Cy Univ Ser D* 4, 1-16.
- KOPP R.F., ABRAHAMSON L.P., WHITE E.H., VOLK T.A., NOWAK C.A., FILLHART R.C., 2001. Willow biomass production during ten successive annual harvests. *Biomass and Bioenergy* 20, 1-7.
- KOYAMA H., KIRA T., 1956. Intraspecific competition among higher plants. 8. Frequency distribution of individuals plat weight as affected by interaction between plants. *J Inst Polytechnic Osaka Cy Univ Ser D* 7, 73-94.
- LABRECQUE M., TEODORESCU T.I., 2005. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy* 29(1), 1-9.
- LAUREYSENS I., BOGAERT J., BLUST R., CEULEMANS R., 2004. Biomass production of 17 poplar clones in short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* 187, 295-309.
- LEDIN S., WILLEBRAND E., 1995. Handbook on how to grow short rotation forest. Swedish Univ Agric Sciences, Uppsala.
- LEMUS R., LAL R., 2005. Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(1), 1-21.
- LIANG W.J., HU H.Q., LIU F.J., ZHANG D.M., 2006. Research advance of biomass and carbon storage of poplar in China. *Journal of Forestry Research* 17(1), 75-79.
- LICHT L.A., ISEBRANDS J.G., 2005. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and Bioenergy* 28, 203-218.
- LONSDALE D., TABBUSH P., 1998. Poplar rust and its recent impact in Great Britain. *Information Note Forestry Commision* 7, 4.
- MACPHERSON G., 1995. Home-grown energy from short-rotation coppice. Farming Press Books, Ipswich. 215 pp.
- MAKESCHIN F., 1999. Short rotation forestry in central and Northern Europe-introduction and conclusions. *Forest Ecology and Management* 121, 1-7.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación), 2006. Registro de Productos Fitosanitarios.
- MARCHADIER H., SIGAUD P., 2005. Los álamos en la investigación biotecnológica. *Unisylva* (FAO) 56, 38-39.
- MARCOS F., 1985. Cultivos energéticos forestales. V Conferencia sobre Planificación, Ahorro y Alternativas Energéticas. Zaragoza.
- MARCOS F., IZQUIERD I., GRACIA R., GODINO M., RUIZ J., VILEGAS S., 2002. Estudio de plantaciones energéticas de chopo (*Populus ×euramericana* cv.I-214) a turnos muy cortos. Documento interno del Departamento de Ingeniería Forestal ETSI de Montes, Madrid. 30 pp.
- MARESCHI L., PARIS P., SABATTI M., NARDIN F., GIOVANARDI R., MANAZZONE S., MUGNOZZA G.S., 2005. Le nuove varietà di pioppo da biomassa garantiscono produttività interessanti. *Informatore Agrario* 61(18), 49-53.
- MEILAN R., MA C., CHENG S., EATON L.K., MILLER R.P., 2000. High levels of roundup® and leaf-beetle resistance in genetically engineered hybrid cottonwoods. En: *Hybrid poplars in the Pacific Northwest: culture, commerce and capability* (Blather K.A., Johnson J.D., Baumgartner D.M., eds). Washington State University Cooperative Extension Bulletin MISC0272, Pullman, WA. pp. 29-38.
- MEZZALIRA G., BROCCHI M., 2002. La coltivazione del genere *Paulownia* nel mondo. *L'Informatore Agrario* 1, 66-73.
- MIRCK J., ISEBRANDS J.G., VERWIJST T., 2004. Development of short rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 28(2), 219-228.

- MITCHELL C.P., FORD-ROBERTSON J.B., HINCKLEY T., SENNERBY-FORSSE L. (eds), 1992. Ecophysiology of short rotation forest crops. Elsevier Science Publishers LTD, Essex, England. 308 pp.
- NARDIN F., ALASIA F., 2004. Use of selected fast growth poplar trees for a woody biomass production die along Po valley. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Roma. pp. 247-249.
- NARDIN F., 2006. Comunicación personal.
- NORDMAN E., ROBISON D., ABRAHAMSON L.P., VOLK T.A., 2005. Relative resistance of willow and poplar biomass production clones across a continuum of herbivorous insect specialization: univariate and multivariate approaches. *Forest Ecology and Management* 217(2-3), 307-318.
- PADRO A., ORENSANZ J., 1987. El chopo y su cultivo. Serie Técnica, MAPA, Madrid. 446 pp.
- PARIS P., PISANELLI A., SABATTI M., MARESCHI L., CANNATA F., SCARASCIA-MUGNOZZA G., 2005. Short rotation forestry in Italy. II Sino-Italian Workshop on Agroforestry, Beijing. 9 pp.
- PEI M.H., RUIZ C., BAYON C., HUNTER T., LONSDALE D., 2005. Pathogenic variation in poplar rust *Melampso- ra larici-populina* from England. *European Journal of Plant Pathology* 111(2), 147-155.
- PINON J., VALADON A., 1997. Comportement des cultivars de peuplier et les orilles. Quelques éléments d'ap- preciation. *Forêt-entreprise* 126, 52-55.
- PONTAILLER J.Y., CEULEMANS R., GUITTET J., 1999. Biomass yield of poplar after five 2-year coppice rota- tions. *Forestry* 72(2), 157163.
- POWLSON D.S., RICHE A.B., SHIELD I., 2005. Biofuels and other approaches for decreasing fossil fuel emissions from agriculture. *Annals of Applied Biology* 146(2), 193-201.
- PROE M.F., GRIFFITHS J.H., CRAIG J., 2002. Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light inter- ception and photosynthesis in short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy* 23, 315-326.
- PURI S., SINGH S., BHUSHAN B., 1994. Evaluation of fuel- wood quality of indigenous and exotic tree species of In- dia's semiarid region. *Agroforestry System* 26(2), 123-130.
- RANNEY J.W., WRIGHT L.L., LAYTON P.A., 1987. Hard- wood energy crops: the technology of intensive culture. *Journal Forest* 85(9), 17-26.
- RYTTER L., 2002. Nutrient content in stem of hybrid aspen as affected by tree age and tree size, and nutrient re- moval with harvest. *Biomass and Bioenergy* 23, 13-25.
- SAN MIGUEL A., MONTOYA J.M., 1984. Resultados de los primeros 5 años de producción de tallares de chopo en rota- ción corta (2-5 años). *Anales INIA, Serie Forestal* 8, 73-91.
- SAN MIGUEL A., SAN MIGUEL J., YAGÜE S., 1992. Tal- lares de chopo a turno corto. *Proceeding 19ª Sesión de la Comisión Internacional del Álamo. Zaragoza. Vol. II*, pp. 143-156.
- SCHOLZ V., ELLERBROCK R., 2002. The growth produc- tivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. *Biomass and Bioenergy* 23(2), 81-92.
- SCHOLZ V., LIUBARSKIJ V., 2005. Energy balance of bio- fuel production and application. 10th International Con- ference New Technological processes and investigation methods for agricultural engineering, Lithuania, Sep- tember. pp. 238-244.
- SINGH B., BEHL H.M., 2001. Scope of *Populus deltoides* on marginal lands of Indo-Gangetic plains. *Indian forester* 127(1), 91-100.
- SIXTO H., GRAU J.M., GARCÍA-BAUDÍN J.M., 2001. As- sessment of the effect of broad-spectrum pre-emergence her- bicides in poplar nurseries. *Crop Protection* 20(2), 121-126.
- SIXTO H., RUIZ V., GRAU J.M., MONTOTO J.L., 2001. Primeros resultados de un ensayo de riego en vivero de planta de chopo. 1.º Simposio del Chopo. *Actas del Con- greso, Zamora*. pp. 159-166.
- SIXTO H., GRAU J.M., ALBA N., ALIA R., 2005. Response to sodium chloride in different species and clones of ge- nus. *Forestry* 78(1), 93-104.
- SIXTO H., BARRIOS M., ALBA N., HERNÁNDEZ M.J., MONTOT J.L., ROIG S., CAMPS F., SALVIA J., RAMOS A., GARCÍA-CABALLERO J.L., RUEDA J., MAZÓN P., CIRIA P., CARRASCO J., CAÑELLAS I., 2006. Poplar trials in Spain for biomass as a renewable energy source. IV International Poplar Symposium (IUFRO), Beijing. 56 pp.
- SIXTO H., GRAU J.M., GONZÁLEZ-ANTOÑANZAS F., 2007. Populicultura: *Populus* spp. e híbridos. Capítulo IV. En: Compendio de selvicultura (aceptado para publicación).
- SIXTO H., BARRIO M., ARANDA I., 2007. Evaluación de criterios para la selección de clones de chopo como pro- ductores de biomasa. XXVII Reunión de la Sociedad Es- pañola de Fisiología Vegetal y X Congreso Hispano-Lu- so de Fisiología Vegetal Alcalá de Henares, septiembre (aceptado).
- SORIA S., 1992. Patología de las choperas. En: Los chopos. Nociones de populicultura (Molowny A., coord). Caja Ru- ral del Duero. pp. 61-75.
- STANTON B.J., 1995. Poplar hybridisation and clonal e- valuation: James River, Lower Columbia River Fibber Farm, Westport Research Station. In: International Poplar Symposium 1995, Seattle, University of Washington. pp.114-115.
- SCURLOCK J.M.O., DAYTON D.C., HAMES B., 2000. Bamboo: an overlooked biomass resource? *Biomass and Bioenergy* 19(4), 229-244.
- STRONG T., HANSEN E., 1993 Hybrid poplar spacing/pro- ductivity relations in short rotation intensive cultive plan- tations. *Biomass and Bioenergy* 14, 307-315.
- STANTURF J.A., VAN OOSTEN C., NETZER D.A., CO- LEMAN M.D., PORTWOOD C.J., 2001. Ecology and sil- viculture of poplar plantations. En: Poplar culture in North America (Dickmans D.I., Isebrands J.G., Eckenwalder J.E., Richardson J., eds). NRC Research Press, National Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa. pp. 13-206.
- STOFFEL R., 1998. Short rotation woody crops. Hybrids poplar. *Proceedings of the Conference Improving Forest Productivity for timber. USA. Vol. 1*.

- THARAKAN P.J., ROBISON D.J., ABRAHAMSON L.P., NOWAK C.A., 2001. Multivariate approach for integrated evaluation of clonal biomass production potencial. *Biomass and Bioenergy* 21(4), 237-247.
- TUBBY I.Y., AMSTRONG A., 2002. Establishment and management of short rotation coppice. *Forestry Commission*. pp. 1-12.
- TUSKAN G.A., 1998. Short-rotation woody crop supply systems in the United States: what do we know and what do we need to know? *Biomass and Bioenergy* 14, 307-315.
- TWEDT D.J., WILSON R.R., HENNE-KERR J.L., HAMILTON R.B., 1999. Impact of forest type and management strategy on avian densities in the Mississippi alluvial valley, USA. *Forest Ecology and Management* 123, 261-274.
- UPDEGRAFF K., BAUGHMAN M.J., TAFF S.J., 2004. Environmental benefits of cropland conversion to hybrid poplar: economic and policy considerations. *Biomass and Bioenergy* 27(5), 411-428.
- VAN VEEN J.A., BRETELER H., OLIE J.J., FRISSEL M.J., 1981. Nitrogen and energy balance of short rotation forest system. Netherlands. *Journal of Agricultural Science* 29, 163-172.
- VEENDALL R., JORGENSEN U., FOSTER C.A., 1997. European energy crops: a synthesis. *Biomass and Bioenergy* 13, 147-185.
- VERWIJST T., 1996. Cyclic and progressive changes in short rotation willow coppice systems. *Biomass and Bioenergy* 11, 161-165.
- WEETMAN G.F., 2000. Silvicultural systems for biomass production in Canada. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1-2), 5-15.
- WETIH M., 2004. Intensive short rotation forestry in boreal climates: present and future perspectives. *Can J For Res* 34, 1369-1378.
- WEINER J., THOMAS S.C., 1986. Size variability and competition in plant monocultures. *Oikos* 47(2), 211-222.
- WILLEBRAND E., LEDIN S., VERWIJST T., 1993. Willow coppice system in short rotation forestry: effects of plant spacing rotation length and clonal composition on biomass production. *Biomass and Bioenergy* 4(5), 323-331.
- WILLEBRAND E., VERWIJST T., 1996. Population dynamic of willow coppice systems and their implications for management of short rotation forests. *Forestry Chronicle* 69, 699-704.
- WILLOUGHBY I., CLAY D., 1996. Herbicides for farm woodlands and short rotation coppice. *Forestry Commission Field Book* 14, 60 pp.
- YIN C., WANG X., DUAN B., LOU J., LI C., 2005. Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric *Populus* species as affected by water stress. *Environmental and Experimental Botany* 53(3), 315-322.
- YODA K., KIRA T., OGAWA H., HOZUMI K., 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J Biol Osaka City Univ* 14, 107-129.
- ZIVANOW N., IVANISEVIC P., HERPKA I., MARKOVIC J., 1985. Influence of fertilizing and irrigation on poplar development in nurseries and plantations. *Radovi, Institut za Topolarrstvo* 16, 119-162.