

Utilización de álamos y sauces para la producción de biomasa para energía

The use of poplar and willow to produce biomass for energy

Virginia M.C. Luquez *

Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), UNLP-CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Argentina

Mauro Bartolozzi

Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), UNLP-CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Argentina

Santiago Martínez

Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), UNLP-CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Argentina

Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Semestral

Vol. 121, núm. 1, 2022

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 06/09/2021

Aprobación: 24/02/22

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/23/233043004/>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e091>

* Autor de correspondencia: vlquez@agro.unlp.edu.ar



Resumen

En esta revisión, se describen las principales características del uso de Salicáceas (álamos y sauces) en plantaciones de rotación corta para producir biomasa para energía. Se analizan distintos tipos de plantaciones para producir biomasa y la sustentabilidad de las mismas. Se resumen los resultados del mejoramiento de sauces y álamos para producir biomasa en distintos países. Finalmente, se discuten aspectos que será necesario investigar para el desarrollo de plantaciones de rotación corta con Salicáceas para producir biomasa en Argentina.

Palabras clave: álamos, sauces, biocombustibles, biomasa leñosa

Abstract

In this revision, the characteristics of short rotation biomass plantations with Salicaceae (poplars and willows) are discussed. Different types of biomass plantations are described and their sustainability is discussed. The results obtained in breeding of poplar and willows for biomass production in different countries are summarized. Finally, there is a discussion of the research needed to develop short rotation bioenergy plantations in Argentina using Salicaceae.

Keywords: poplars, willows, biofuels, woody biomass

INTRODUCCIÓN

La madera fue la principal fuente de energía de la humanidad durante milenios, hasta que fue reemplazada por los combustibles fósiles (primero carbón y luego petróleo y gas natural) a partir de la Revolución Industrial (Sannihagri et al., 2010). Pero las reservas de combustibles fósiles son limitadas, mientras que la biomasa es un recurso renovable. Además, el uso masivo de combustibles fósiles ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentando la temperatura global (IPCC, 2014). Por lo tanto, existe la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ para mitigar los efectos del cambio climático. Estos factores han revitalizado el uso de la biomasa como combustible para producir energía. A diferencia de otras energías renovables como la solar o eólica, la biomasa se puede almacenar y está disponible todo el año. La biomasa puede provenir tanto de desechos industriales y restos de cultivos agrícolas y forestales, como de cultivos bioenergéticos destinados exclusivamente a ese fin (Baettig et al., 2010). Entre los cultivos bioenergéticos perennes más importantes se encuentran *Panicum virgatum* (pasto aguja o pasto varilla, switchgrass en inglés), distintas especies e híbridos del género *Miscanthus*, la caña *Arundo donax*, y leñosas de crecimiento rápido como sauces (*Salix* spp.), álamos (*Populus* spp.), eucaliptos y acacias (Karp & Shield, 2008).

Los biocombustibles obtenidos de la biomasa se pueden dividir en tres grandes categorías: sólidos, líquidos y gaseosos (Baettig et al., 2010). Los biocombustibles sólidos corresponden a los pellets, chips y briquetas, incluyendo la leña y el carbón vegetal. Los biocombustibles líquidos comprenden el bioetanol y biodiesel, y los gaseosos (biogás) constituyen una mezcla de diferentes gases como monóxido de carbono, metano e hidrógeno (Baettig et al., 2010). La biomasa leñosa en cualquiera de sus formas puede ser utilizada directamente para la generación de calor o electricidad, pero para obtener biocombustible líquidos o gaseosos la biomasa debe ser transformada por la acción de microorganismos que convierten las moléculas complejas de la biomasa en alcohol o gases para utilizarlos como combustibles. Actualmente, la mayor parte de los biocombustibles líquidos se obtienen a partir de la fermentación alcohólica de cultivos ricos en azúcares y almidón, como maíz, trigo, remolacha azucarera y caña de azúcar (Karp & Shield, 2008). Estos cultivos se usan también como alimentos y su producción requiere muchos recursos (alta calidad de suelo, fertilizantes, control de plagas, etc.), por lo que se ha planteado como deseable que estos biocombustibles (denominados de primera generación) sean sustituidos por otros obtenidos a partir de la biomasa de cultivos bioenergéticos denominados de segunda generación (Solomon et al., 2007; Karp & Shield, 2008). Estos cultivos tienen la ventaja de que no demandan tantos recursos, y podrían ser cultivados en áreas marginales, reduciendo la competencia por la tierra con los cultivos alimentarios (Karp & Shield, 2008; Valentine et al., 2012; Clifton-Brown et al., 2019). La dificultad que tienen los cultivos leñosos es que la madera es un material complejo, compuesto principalmente de celulosa, hemicelulosas, pectinas y lignina (Chanoca et al., 2019). La celulosa es el compuesto del cual se puede obtener etanol, y hay que separarla primero de los otros componentes para convertirla en biocombustible líquido (Serapiglia et al., 2013, Chanoca et al., 2019). En esta revisión no profundizaremos en los procesos para convertir a la biomasa en combustibles líquidos o gaseosos, ya que se necesitaría una revisión dedicada exclusivamente a estos temas. En particular, nos concentraremos en los sistemas destinados a la producción de biomasa leñosa sólida utilizando Salicáceas, que comprende los géneros *Populus* (álamos) y *Salix* (sauces), y las posibilidades de desarrollar este tipo de plantaciones a nivel comercial en Argentina. Los sauces y álamos, junto con *Miscanthus* y *Panicum virgatum*, son considerados los cultivos bioenergéticos más prometedores para las zonas de clima templado (Clifton-Brown et al., 2019).

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA CON SALICÁCEAS

Debido a las características de estas especies, el uso de álamos y sauces para producir biomasa en sistemas de alta densidad de rotación corta (2 a 12 años) es muy conveniente. Son especies de crecimiento rápido, se pueden propagar vegetativamente a partir de estacas leñosas, toleran elevadas densidades de plantación, y tienen la capacidad de rebrotar luego del corte (Keoleian & Volk, 2005). Las plantaciones clonales así obtenidas son más uniformes, lo cual facilita la cosecha mecánica (Eisenbies et al., 2017). El objetivo en los sistemas de producción de biomasa es optimizar tanto la productividad como los costos a lo largo de varias rotaciones (Keoleian & Volk, 2005).

Se han utilizado distintas especies e híbridos de álamo y sauce para producir biomasa para energía. En el caso de los álamos, las especies plantadas son *P. trichocarpa*, *P. deltoides*, *P. nigra*, *P. maximowiczii*, *P. balsamifera*, *P. alba* y distintos híbridos entre algunas de estas especies, especialmente *P.x canadensis* (*P. deltoides* x *P. nigra*, Clifton- Brown et al., 2019). En el norte de Europa, se han utilizado los híbridos de *P. tremula* x *P.tremuloides* para la producción de biomasa (Tullus et al., 2012). En el caso de los sauces, se han plantado principalmente especies arbustivas, como *S. viminalis*, *S. dasyclados*, *S. miyabeana*, *S. purpurea*, *S. schwerini*, *S. triandra* e híbridos entre estas especies (Karp & Shield, 2008; Clifton- Brown et al., 2019).

Hay dos modelos principales para la producción de biomasa para energía, denominados MRF ("Medium Rotation Forestry", Baettig et al., 2010) y el SRC ("Short Rotation Coppice", Karp et al., 2011). El sistema MRF tiene densidades de plantación entre 400-2200 plantas por hectárea y rotaciones entre 6 y 12 años dependiendo del sitio y el genotipo (Buchman et al., 2020; Niemczyk, 2021). La plantación se establece a partir de estacas o guías sin raíces, y la cosecha se lleva a cabo con el mismo equipamiento que las plantaciones forestales tradicionales de rotación más larga (Buchman et al., 2020). Si bien estos sistemas tienen productividades menores que los sistemas SRC, tienen más flexibilidad pudiendo utilizarse no sólo para la producción de biomasa sino también para obtener otros productos como pulpa para papel o madera para pallets (Baettig et al., 2010).

El sistema de producción de biomasa denominado "Short Rotation Coppice" (SRC) fue desarrollado originalmente en el noroeste de Europa (Figura 1). Normalmente, los árboles tienen una yema apical que domina a las yemas laterales, impidiendo su brotación, por lo que existe un tallo dominante. El corte (recepado) luego del primer año de crecimiento elimina este efecto de dominancia apical, estimulando la brotación de las yemas laterales y consecuentemente la producción de múltiples tallos por planta, lo cual incrementa el rendimiento por unidad de superficie (Karp & Shield, 2008, Figura 1). Este manejo es la principal diferencia con el sistema MRF, que no se recepa y mantiene un tallo dominante. Las plantaciones se establecen a partir de estacas sin raíces, y se han desarrollado plantadores mecánicos a escala comercial (Clifton- Brown et al., 2019). El tiempo de rotación varía normalmente entre 2 y 4 años, y la biomasa es cosechada mecánicamente durante el invierno, utilizando equipamiento agrícola modificado. Una plantación SRC puede permanecer productiva por al menos 20 años (Keoleian & Volk, 2005).

La molienda del material leñoso (chipeado) se puede realizar en otro sitio, trasladando los fustes cosechados (Verwijst et al., 2013), o en el campo al mismo tiempo que la cosecha, porque frecuentemente esta última opción es más económica (Figura 1, Vanbeveren et al., 2015; Eisenbies et al., 2017). Debido a que el equipamiento y el combustible son caros, la cosecha mecánica es uno de los principales costos de las plantaciones SRC (Eisenbies et al., 2017). Una vez cosechados, los chips pueden ser utilizados en la fabricación de pellets o briquetas, o ser consumidos en plantas energéticas que producen electricidad y agua caliente para calefacción domiciliaria, como la que se muestra en la Figura 2 y que se encuentra en Suecia. El marco de plantación utilizado en SRC es frecuentemente de doble hilera, debido a que este esquema facilita la cosecha mecánica. La densidad de plantación y la longitud de la rotación están asimismo definidas en gran medida por el tipo de cosechadora que se utiliza (Verwijst et al., 2013). Las densidades de plantación utilizadas comercialmente varían entre 5000 y 20000 plantas por hectárea dependiendo del sitio y del genotipo, utilizándose densidades más elevadas para sauces que para álamos (Keoleian & Volk, 2005, Baettig et al. 2010). Una elevada densidad de plantación aumenta el crecimiento inicial, pero también incrementa los costos de establecimiento. No siempre la mayor densidad de plantación implica mayor productividad, ya que hay una importante influencia del sitio, el genotipo y la longitud de la rotación (Stolarski et al., 2018; Kulig et al., 2019; Yañez et al., 2019). En la práctica, hay que ajustar la densidad de plantación teniendo en cuenta los factores mencionados.

Un factor importante al inicio de la plantación tanto para MRF como SRC es el control de malezas, ya que compiten por recursos con las estacas que todavía están desarrollando raíces, reduciendo el crecimiento inicial de las plantas (Verwijst et al., 2013; Albertsson et al., 2014; Schulz et al., 2016). Para el control de malezas, hay tres modalidades principales: control mecánico, control químico (herbicidas) y la utilización de mulching con materiales como plásticos y chips de madera (Böhlenius & Övergaard, 2015; Schulz et al., 2016; Han et al., 2020). La posibilidad de control mecánico de las malezas depende de que el espaciado entre hileras permita el uso de maquinaria para llevar a cabo la tarea (Verwijst et al., 2013). El uso de plástico negro como mulching cubriendo totalmente el suelo es habitual en estaqueros para producir material de propagación en el Delta del Paraná y otras zonas en Argentina (Figura 3A). Esta alternativa no sería viable para una plantación SRC que se coseche mecánicamente ya que el mulching sería dañado por el paso reiterado de la maquinaria de cosecha. Una posible alternativa (Figura 3B) es

controlar las malezas en la fila plantando sobre una malla de polipropileno biodegradable, que deja pasar el agua, pero no la luz, mientras que entre las filas el control se realiza por métodos químicos o mecánicos (Böhlenius & Övergaard, 2015). Para reducir el impacto ambiental de las plantaciones, se trata de limitar el uso de herbicidas y utilizar las otras alternativas disponibles para el control de malezas (Han et al., 2020). Los herbicidas utilizados varían de acuerdo al tipo de maleza a controlar, y son los mismos que se usan en agricultura (Achinelli, 2007; Verwijst et al., 2013). Antes de la plantación, se eliminan las malezas utilizando glifosato, pero normalmente no se aplican herbicidas cuando las plantas están en crecimiento para evitar los efectos tóxicos. Por lo general, el control químico se lleva a cabo en el primer año de crecimiento, en los años subsiguientes no es necesario ya que el sombreado del canopeo de las plantas impide el crecimiento de las malezas (Verwijst et al., 2013). Por este motivo, el uso de herbicidas en plantaciones SRC es menor comparado con un cultivo agrícola (Weih, 2004).

Una de las posibles desventajas del uso de las Salicáceas es su elevada demanda de agua, debido a que muchas especies, especialmente los sauces, crecen naturalmente en áreas ribereñas inundables (Rodríguez & Luquez, 2016). Wullschleger et al. (1998) analizaron los valores publicados de uso del agua a nivel de árbol individual de distintas especies forestales, que variaron entre 17 y 400 kg día⁻¹. En el caso de los sauces, el uso de agua varió entre 106 y 140 kg día⁻¹, mientras que para *P. trichocarpa* x *P. deltoides* fue de 51 y para *Populus x euramericana* 109 kg día⁻¹. En base a estos resultados, es evidente que hay diferencias marcadas entre especies de Salicáceas, y que no son las especies forestales con mayor demanda hídrica. Por otro lado, las Salicáceas son susceptibles a la sequía (Fichot et al., 2009), y en algunas regiones, la disponibilidad de agua es el principal factor que limita la producción en sistemas SRC (Bergante et al., 2010; Doffo et al., 2017a). Sin embargo, hay variabilidad genética en la tolerancia a la sequía tanto en álamo como en sauce, lo que permitiría seleccionar genotipos con mayor tolerancia a este estrés (Wikberg & Ögren, 2007; Fichot et al., 2009; Doffo et al., 2017a; Nyemczyk et al., 2019). En el caso de terrenos inundables, sería preferible plantar sauces debido a que son más tolerantes al anegamiento que los álamos (Rodríguez & Luquez, 2016).

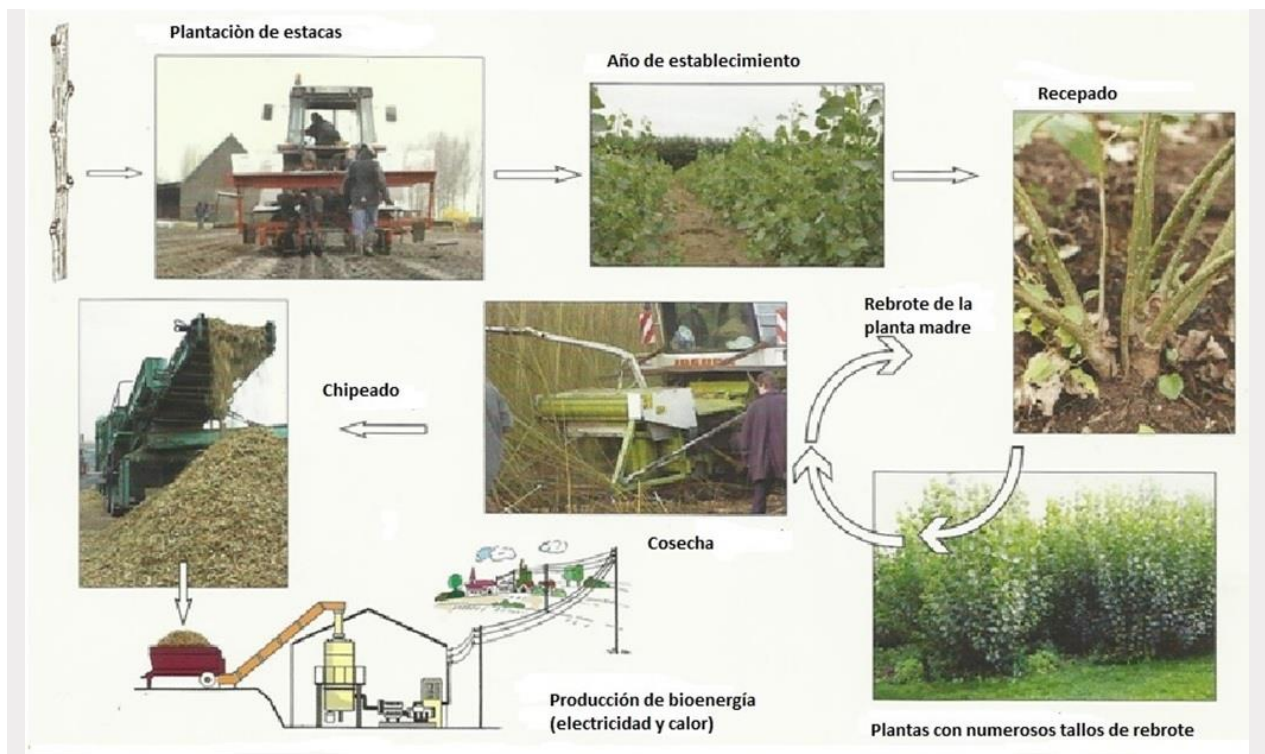


Figura 1

Esquema de una plantación SRC tal como se desarrolla en países europeos. Adaptado con permiso de R. Ceulemans (responsable del diseño), A. Muys (autor del dibujo), Universidad de Antwerp, Bélgica.

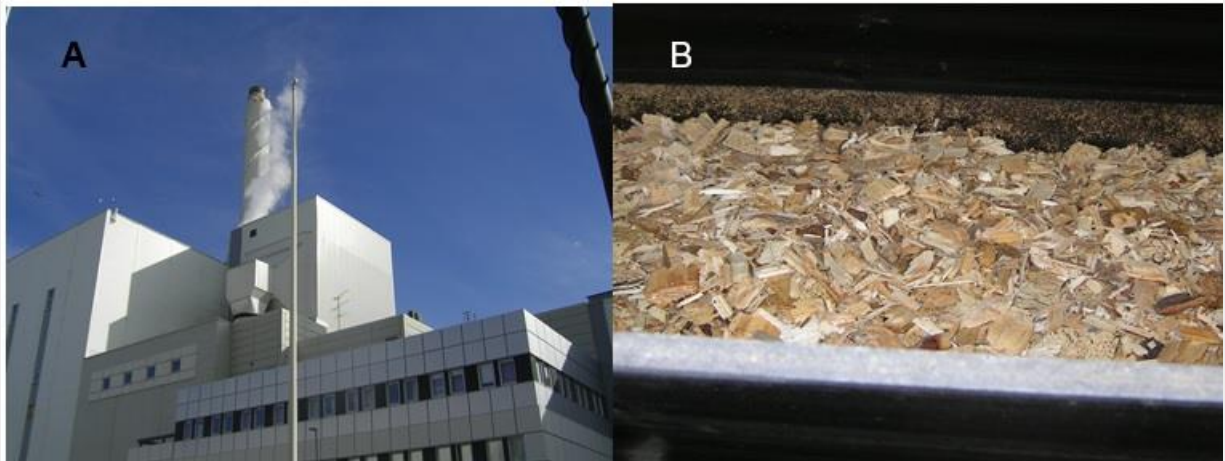


Figura 2

Planta de energía (A) que funciona con chips de madera (B) en la localidad de Enköping, Suecia. Fotos: Virginia Luquez.



Figura 3

Control de malezas utilizando mulching en plantaciones de Salicáceas de alta densidad. A: Nylon negro permanente en estaquero de álamo en el Delta del Paraná. B: Malla de polipropileno biodegradable en las filas de plantación de álamo, Suecia. Fotos Virginia Luquez.

Otra desventaja es que las elevadas densidades de plantación incrementan el riesgo de infecciones por hongos patógenos y otras adversidades bióticas, por lo que es necesaria la aplicación de fungicidas y pesticidas en plantaciones comerciales (Weih, 2004; Baettig et al., 2010). Distintas especies de hongos del género *Melampsora*, causantes de roya, constituyen una limitante importante en el rendimiento de plantaciones comerciales de Salicáceas para bioenergía en Europa (Rönnberg-Wästljung et al., 2008). En una plantación experimental SRC con sauces en la provincia de Buenos Aires, las hormigas cortadoras demostraron ser una plaga importante (Doffo et al., 2017a). Para reducir el riesgo de plagas, se recomienda

la plantación a campo de al menos 5 genotipos diferentes, evitando plantaciones monoclonales (Weih, 2004; Verwijst et al., 2013; Clifton-Brown et al., 2019).

SUSTENTABILIDAD DE LAS PLANTACIONES DE ROTACIÓN CORTA

Hay tres aspectos importantes a analizar en las plantaciones bioenergéticas: el balance energético, el balance económico y las emisiones de CO₂.

En el caso del balance energético, lo importante es que este sea positivo, esto es, que la energía producida por la biomasa sea mayor que la energía invertida en todos los procesos destinados a obtenerla (plantación, cuidados culturales, cosecha, transporte a la planta energética). Para las Salicáceas, este balance es positivo, pero dependiendo del genotipo y el sitio, la relación energía producida/energía invertida puede variar entre 9 y 62 (Porsö & Hansson, 2014; Njakou Djomo et al., 2015). Los sitios con mayor productividad por unidad de área, si bien consumen más energía, también son más productivos y la relación entre la energía invertida y la producida es más alta que en los sitios con menor productividad (Njakou Djomo et al., 2015).

La producción de energía por combustión es afectada por la calidad de la biomasa, que depende de distintos factores: la capacidad calorífica de la madera, el contenido de humedad y el contenido de cenizas (Sannigrahi et al., 2010; Luke Williams et al., 2016; Štochlová et al., 2019). Estos factores pueden ser afectados por el genotipo y el sitio (Tharakan et al., 2003; Liu et al., 2017; Rodrigues et al., 2017). La capacidad calorífica por unidad de biomasa seca es muy similar dentro de cada especie, por lo que la energía producida depende principalmente de la producción de biomasa y del contenido de humedad, que varían con el genotipo (Verlinden et al., 2013; Achinelli et al., 2018).

El balance económico de las plantaciones es muy variable, dependiendo de diversos factores como el país en donde se instale dicha plantación, el sitio, los genotipos y el precio del petróleo (Valentine et al., 2012; Stanton et al., 2021). Uno de los aspectos cruciales es que las plantaciones bioenergéticas no deben estar muy alejadas del punto de consumo, porque los elevados costos de transporte las hacen económicamente inviables (Uasuf & Hilbert, 2012). Idealmente, se debería utilizar biomasa producida localmente, tanto por la viabilidad económica como para reducir las emisiones de CO₂ involucradas en el transporte (Keoleian & Volk, 2005). En casi todos los países, es necesario subsidiar las plantaciones bioenergéticas para que sean económicamente viables (Keoleian & Volk, 2005; Njakou Djomo et al., 2015; Shoosharian et al., 2018). Una manera de mejorar el balance económico sería valorar los beneficios ambientales que producen las plantaciones bioenergéticas. Por ejemplo, algunos estudios muestran que las plantaciones bioenergéticas incrementan la diversidad de la flora y la fauna, en comparación con cultivos agrícolas (Christian et al., 1994; Weih et al., 2003).

Otro aspecto importante es que las plantaciones bioenergéticas sean carbono-neutras, esto es, que no contribuyan a incrementar las emisiones de CO₂. Esto se estima mediante un análisis de las emisiones de CO₂ del ciclo completo de cultivo, desde la plantación hasta la cosecha (Solomon et al., 2007; Krzyżaniak et al., 2016). Este es un tema importante, porque el almacenamiento de carbono en la parte aérea que se cosecha para producir energía es de corta duración. Sin embargo, hay datos que indican que las plantaciones SRC de álamo incrementan el almacenamiento de materia orgánica en el suelo, debido al aporte de las raíces y la caída de hojas en el otoño, y que este secuestro de carbono es de mayor magnitud que en la parte aérea (Berhongaray et al., 2015, Berhongaray et al., 2019). Resultados similares se obtuvieron con plantaciones SRC de sauce (Agostini et al., 2015; Gregory et al., 2018). Al menos en el corto plazo, las plantaciones SRC aumentarían el carbono almacenado en el suelo, pero es necesario analizar períodos más largos para determinar si ese efecto perdura en el tiempo (Agostini et al., 2015).

Otro tema importante en las plantaciones de rotación corta es la fertilización, debido al corte frecuente es necesario reponer los nutrientes exportados con la biomasa. Hay situaciones en las cuales la fertilización es inevitable, por ejemplo, en zonas boreales del hemisferio norte donde los suelos son naturalmente pobres en nitrógeno (Weih, 2004). En algunos casos, la biomasa se incrementó linealmente con la dosis de fertilizante aplicado (Fabio & Smart, 2018). Pero esta práctica no siempre tiene un efecto positivo. Quayle & Volk (2013) reportaron un ensayo de fertilización de plantaciones SRC de sauce con 3 fertilizantes (urea, compost y residuos de tambo), para 2 variedades en 3 sitios en el noroeste de USA. No hubo diferencias significativas entre sitios, genotipos ni fertilizantes para la primera rotación. En otro ensayo se analizó el crecimiento de una plantación SRC de sauces con y sin fertilizante, a lo largo de 15 años y 4 turnos de rotación (Nissim et al., 2013). En este caso, el tratamiento fertilizado produjo más biomasa que el no

fertilizado (19,2 contra 13,8 toneladas de materia seca por hectárea y año). Dado que el uso de fertilizantes contribuye a aumentar tanto el costo como las emisiones de CO₂ y el consumo de energía de las plantaciones forestales, la fertilización debe hacerse con cuidado. Si el suelo tiene concentraciones adecuadas de nutrientes, no sería necesario fertilizar en la primera rotación (Nelson et al., 2019). También hay que tener en cuenta que una parte de los nutrientes son reciclados debido a que son almacenados en el tallo y raíces durante el invierno, y la caída del follaje puede aportar algunos nutrientes al suelo (Meiressone et al., 2007; Brereton et al., 2014; Fortier et al., 2017). Pero a medida que transcurran las rotaciones habrá una extracción neta de nutrientes con la cosecha (Toillon et al., 2013), y es evidente la necesidad de reponer los nutrientes exportados. En consecuencia, la fertilización de las plantaciones debe ser ajustada de acuerdo a distintos factores como tipo de suelo, genotipo, y la duración de la rotación.

Otra posibilidad interesante es la combinación de la producción de biomasa con servicios ambientales como el tratamiento de aguas servidas y la fertilización con desechos industriales. Las Salicáceas producen un denso sistema radicular que actúa como un filtro, absorbiendo tanto nutrientes como metales pesados y otros contaminantes (Kuzovkina & Volk, 2009; Schmidt-Walter & Lamersdorf, 2012; Dimitriou & Mola-Yudego, 2017; Thijs et al., 2018). La Figura 4 muestra una situación de este tipo: una plantación SRC de sauce que es regada con aguas servidas en Suecia. Otro ejemplo es el uso de agua conteniendo desechos de lavado de tambor para regar plantaciones SRC de sauce. Esta práctica no afectó negativamente el crecimiento de las plantas y redujo la contaminación en el ambiente (Forbes et al., 2017). En la provincia de Neuquén, se probaron distintos clones de álamo y sauce plantados a alta densidad (13333 plantas ha⁻¹) para el tratamiento de efluentes, con muy buenos resultados (Tucat et al., 2016).

La fertilización de plantaciones bioenergéticas con distintos desechos orgánicos tiene múltiples beneficios. Además de reducir la contaminación ambiental, al reemplazar a los fertilizantes sintéticos disminuyen tanto las emisiones de CO₂ como el costo económico de las plantaciones bioenergéticas (Vanholme et al., 2013).



Figura 4

Combinación de producción de biomasa para energía con servicios ambientales en plantaciones de alta densidad de sauces en Suecia. Las aguas servidas se trasladan a una laguna de decantación (A) desde donde el agua se bombea para regar las plantaciones SRC de sauce para producir biomasa (B). El productor cobra al municipio por el tratamiento del agua, y además vende la biomasa cosechada a una planta de energía. Fotos: Virginia Luquez.

MEJORAMIENTO DE SALICÁCEAS PARA PRODUCIR BIOMASA PARA ENERGÍA

Tanto en las especies puras como en los híbridos de álamos y sauces, hay una considerable variabilidad genética en el crecimiento entre los distintos clones, que ha sido explotada para el mejoramiento (Verlinden et al., 2013; Berlin et al., 2017; Vanbeveren & Ceulemans, 2018; Yañez et al., 2019). En varios países existen programas de mejoramiento enfocados en la obtención de genotipos para la producción de biomasa desde hace varias décadas, incrementando el rendimiento desde 6-7 toneladas a 14 toneladas secas por hectárea anuales en promedio para los sauces (Karp et al., 2011).

Los caracteres seleccionados en los genotipos utilizados para producir biomasa en SRC son: crecimiento rápido, rebrote vigoroso, tallos erectos y tolerancia a enfermedades y pestes (Karp et al., 2011; Hanley & Karp, 2014). Otros caracteres deseables son menor contenido de humedad a cosecha, menor cantidad de cenizas como resultado de la combustión, tolerancia a estreses abióticos y diferente composición de acuerdo al uso que se dará a la biomasa (Clifton-Brown et al., 2019). Las diferencias de composición se refieren principalmente al contenido de lignina. Para biomasa sólida un mayor contenido de lignina es favorable, mientras que es desfavorable si el objetivo de la biomasa es obtener bioetanol (Karp et al., 2011; Clifton-Brown et al., 2019). Se han encontrado diferencias genotípicas en contenido de lignina (Studer et al., 2011; Berthod et al., 2015) por lo cual se podrían seleccionar diferentes clones para obtener biocombustibles sólidos o líquidos a partir de biomasa.

Otro aspecto importante es la interacción del genotipo con el sitio. Si esta interacción no es importante, significa que los clones seleccionados se comportan de forma similar en sitios dispares (Nelson et al., 2019). Pero esta interacción es significativa en muchos casos, por lo cual habría que seleccionar genotipos para cada ambiente en particular (Sevel et al., 2012; Mosseler et al., 2014; Nord-Larsen et al., 2015). La situación ideal para la sustentabilidad de las plantaciones es maximizar la productividad por unidad de área, pero esto no siempre es posible en sitios marginales, debido a la ocurrencia de distintos estreses (Njakou Diomo et al., 2015).

Se ha utilizado también la biotecnología para el mejoramiento de las Salicáceas para bioenergía. Una manera de acelerar los tiempos requeridos para el mejoramiento es utilizar selección asistida por marcadores, identificando marcadores moleculares asociados con los caracteres que se desea mejorar (Karp et al., 2011). Tanto en álamo como en sauce, se han identificado marcadores relacionados al rendimiento y calidad de biomasa (Novaes et al., 2009; Rae et al., 2009; Berlin et al., 2014; Du et al., 2016; Berlin et al., 2017), para caracteres fenológicos (Ghelardini et al., 2014; Berlin et al. 2017) y tolerancia a estreses bióticos y abióticos (Jorge et al., 2005; Rönnerberg-Wästljung et al., 2008; Samils et al., 2011; Berlin et al., 2014). La identificación de marcadores moleculares ha sido favorecida por la disponibilidad de la secuencia genómica completa de varias especies. *Populus trichocarpa* fue el primer árbol cuyo genoma fue secuenciado, y actualmente están disponibles los genomas de 29 especies e híbridos de *Populus* y 3 especies de sauce (*Salix purpurea*, *S. suchowensis* y *S. viminalis*, Almeida et al., 2020; Wang et al., 2020).

El uso de genotipos transgénicos se ha desarrollado en álamo, pero no así para sauces, ya que no existe un protocolo estándar confiable de transformación (Clifton-Brown et al., 2019). Utilizando este enfoque, se ha investigado la posibilidad manipular el contenido de lignina (Chanoca et al., 2019) e introducir tolerancia a herbicidas y diversos estreses (Ye et al., 2011; Naidoo et al., 2019). Otro aspecto que ha recibido considerable interés es la producción de árboles estériles, para evitar que los transgenes se expandan hacia poblaciones naturales de Salicáceas (Fristche et al., 2018). El único país que ha liberado variedades comerciales transgénicas de álamo es China, estos árboles son resistentes a insectos (Wang et al., 2018).

El mejoramiento futuro de Salicáceas en rotaciones cortas para producir biomasa no solo apunta a proporcionar energía, sino también a producir biopolímeros y otros materiales que reemplacen a productos actualmente derivados del petróleo (Krzyżaniak et al., 2016).

ESTADO DEL TEMA EN LA ARGENTINA

En la Argentina, el 87% de la energía consumida proviene de combustibles fósiles, los biocombustibles (mayormente de primera generación) representan solamente el 6,1% (FAO, 2020). Para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles será necesario, entre otras acciones, desarrollar cultivos dendroenergéticos. En la Argentina, distintas industrias usan residuos forestales para generar calor y electricidad, y para la producción de pellets (Uasuf & Hilbert, 2012). Uasuf & Becker (2011) determinaron

los costos de producción de pellets a partir de distintos residuos de industrias forestales en la Mesopotamia argentina. Pero en algunos casos, la disponibilidad de residuos de las industrias agrícolas y forestales no es constante, y es necesario contar con la biomasa de cultivos bioenergéticos para mantener el funcionamiento de las plantas energéticas (Stanton et al., 2021). De acuerdo a un informe elaborado por el INTA, MAGYP y FAO, en la Argentina hay 15 millones de hectáreas no aptas para agricultura que se podrían usar para cultivos dendroenergéticos (FAO, 2020). En estas zonas marginales es frecuente la ocurrencia de estreses como inundación, sequía y salinidad, por separado o combinados en forma sucesiva o simultánea. Si se quieren desarrollar plantaciones dendroenergéticas en esos ambientes, hay que identificar genotipos que puedan establecerse y crecer en esas condiciones de estrés. En el caso de los genotipos de álamos y sauces plantados en Argentina, se han identificado clones con tolerancia variable a inundación (Luquez et al., 2012; Luquez et al., 2018; Rodríguez et al., 2021), a diferentes grados de disponibilidad hídrica y salinidad (Alvarez, 2018), a sequía (Guarnaschelli et al., 2011), salinidad (Quiñones Martorello et al., 2017), a alternancia de inundación y sequía (Doffo et al., 2017b) y a combinación de hipoxia y salinidad (Quiñones Martorello et al., 2020).

Con respecto a los sistemas productivos para producir biomasa, un sistema del tipo MRF sería más sencillo de implementar. Este sistema es una variante de las plantaciones utilizadas para producir materia prima para pulpa para papel y tableros, y estas plantaciones existen en Argentina para varias especies que se usan para producir biomasa, incluyendo álamos y sauces. Para estas plantaciones existe información sobre prácticas silviculturales, genotipos adecuados y costos, que servirían como base para el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas (FAO, 2020). La implementación de sistemas SRC requerirá mucha más investigación (Volk et al., 2006). Si bien no existen actualmente plantaciones comerciales dedicadas exclusivamente a la producción de biomasa en Argentina (Borodowski, 2017), hay disponibles resultados de algunas plantaciones experimentales en distintos lugares del país. Los rendimientos fueron mayores en plantaciones regadas con efluentes tratados, alcanzando 28 t secas ha⁻¹ año⁻¹ con *P. xcanadensis* Conti 12" en Mendoza (Bustamante et al., 2011) y 45 t secas ha⁻¹ año⁻¹ con *S.matsudana* x *S. alba* "Los Arroyos" en Neuquén (Tucat et al., 2016; E. Thomas comunicación personal). Estos rendimientos elevados se deben tanto a la disponibilidad hídrica adecuada como a los nutrientes aportados por las aguas servidas utilizadas para riego, en ambos casos la duración de la rotación fue de 2 años. En una plantación de sauces en la provincia de Buenos Aires con una rotación de un año, el tratamiento con riego por goteo produjo entre 18 y 23 t secas ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en el tratamiento de secano la productividad varió entre 11 y 17 t secas ha⁻¹ año⁻¹ (Doffo et al., 2017a). La mayor variabilidad del tratamiento de secano de debió principalmente a la variabilidad interanual en precipitaciones. Las productividades anuales en secano son similares a las obtenidas en sistemas SRC con genotipos mejorados para biomasa en Europa y América del Norte (Doffo et al., 2017a). Cerrillo et al. (2020) analizaron 21 genotipos de sauce en una rotación de 3 años en la zona del Delta del Paraná, con dos densidades de plantación (3333 y 10000 plantas por ha). El clon Ibicuy fue el más productivo, con valores de 3,87 kg peso seco por planta (4,3 toneladas ha⁻¹ año⁻¹) en la densidad más baja, y 2,5 kg peso seco por planta (7,2 toneladas ha⁻¹ año⁻¹) en la densidad más alta.

Un aspecto importante es que en todos estos ensayos se utilizaron genotipos locales que no fueron mejorados específicamente para producir biomasa, y en particular los sauces analizados son especies arbóreas en vez de las arbustivas utilizadas habitualmente para SRC en Europa y América del Norte. Si bien estos resultados son promisorios, hay que ajustar muchos aspectos importantes de las prácticas de manejo. Un punto importante es aumentar el número de genotipos testeados para SRC, y determinar la estabilidad del rendimiento de los clones para los distintos sitios (Nelson et al., 2019). Los ensayos deberían cubrir un área geográfica mayor, especialmente en las zonas identificadas como aptas para este tipo de plantaciones (FAO, 2020). La utilización de aguas de efluentes para riego (que no se pueden utilizar en cultivos alimenticios) es una alternativa interesante, dados los elevados rendimientos obtenidos en plantaciones experimentales en Mendoza y Neuquén (Bustamante et al., 2011; Tucat et al., 2016). Sería interesante que estas experiencias se replicaran en otros sitios, para lo cual sería necesario identificar cuáles son los clones locales aptos para esta finalidad.

PERSPECTIVAS FUTURAS

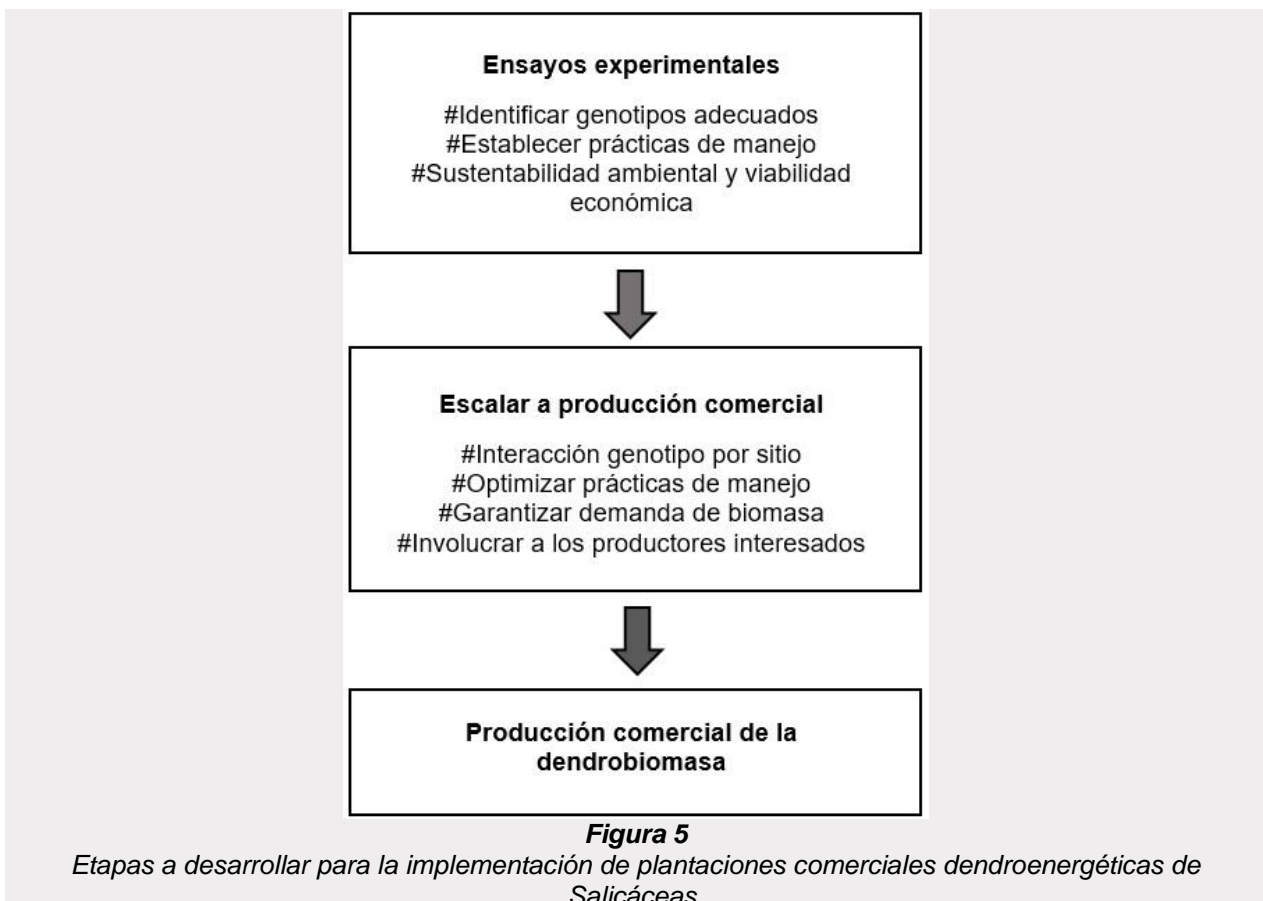
La tecnología para producir energía a partir de biomasa sólida está desarrollada, la principal limitante es proporcionar en forma estable la cantidad de biomasa requerida para el funcionamiento continuo de las plantas energéticas (Stanton et al., 2021).

En la Argentina, en las zonas con una foresto industria desarrollada, las empresas utilizan los residuos como chips para producir energía en calderas, o como materia prima para la producción de pellets (Uasuf & Beckett, 2011). El desarrollo de plantaciones exclusivamente bioenergéticas en esas zonas no tiene mucho sentido, al menos que las necesidades de biomasa no sean cubiertas por los residuos industriales más la biomasa originada en la poda y raleo de las plantaciones forestales tradicionales. Transportar biomasa a través de grandes distancias es muy caro, la situación ideal es consumir localmente la biomasa producida (Uasuf & Hilbert, 2012). La investigación para desarrollar plantaciones bioenergéticas debería enfocarse en las áreas donde no hay disponibilidad local de dendrobiomasa, pero hay una potencial demanda de la misma.

Para desarrollar plantaciones bioenergéticas a escala comercial en la Argentina, habría que desarrollar una serie de pasos resumidos en la Figura 5.

Primero, habría que establecer una red de ensayos experimentales en las zonas con potencial para el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas. Estos ensayos permitirían identificar cuáles son los genotipos y el manejo adecuado, así como la sustentabilidad ambiental y económica de las plantaciones de rotación corta.

En una segunda etapa, habría que escalar a producción comercial (Figura 5), optimizando los distintos procesos (material genético, plantación, manejo, cosecha, etc.) para trabajar a esta escala. Aquí es crucial determinar cuáles genotipos son los más adecuados para cada zona (interacción genotipo x sitio). Otro tema importante es la cosecha de la biomasa, que en los ensayos experimentales generalmente es manual y no mecánica. En Europa se usa la cosecha mecánica para SRC, porque resulta más eficiente y económica que la cosecha manual (Vanbeveren et al., 2015). Pero la maquinaria tiene un costo elevado, y la evaluación comparativa de costos entre cosecha manual y mecánica no se ha llevado a cabo en Argentina. El tipo de maquinaria de cosecha también define la longitud de la rotación y el marco de plantación, y esta información es imprescindible para escalar las plantaciones a producción comercial (Volk et al., 2006; Stanton et al., 2021).



En paralelo, habría que involucrar a los productores interesados, y asegurar que habrá demanda para la biomasa producida, de modo que las plantaciones sean económicamente viables (Volk et al., 2006; Buchman et al., 2020). Tiene que haber un mercado cercano para la biomasa producida, por los elevados costos de transporte que tiene la biomasa. Uasuf & Hilbert (2012) sugieren no más de 100 km de distancia entre la plantación y el destino de consumo, pero esta distancia puede variar de acuerdo a las características de cada región.

Para impulsar el desarrollo de las plantaciones se requerirá una política de subsidios, como ha sucedido en otros países (Volk et al., 2006; Njakou Djomo et al., 2015; Shoosharian et al., 2018). Todos estos pasos serán necesarios antes de poder comercializar biomasa producida en sistemas dendroenergéticos de rotación corta (Figura 5). Una vez obtenida la información resumida en la Figura 5, se deberían elaborar recomendaciones sobre genotipos y prácticas de manejo de plantaciones de rotación corta con Salicáceas para los productores, como existen en otros países (Abrahamson et al., 2010; Buchman et al., 2020). Obtener esta información será imprescindible para desarrollar los cultivos bioenergéticos comerciales con Salicáceas que contribuyan a disminuir la dependencia de Argentina de los combustibles fósiles.

Agradecimientos

V.M.C. Luquez es investigadora de CONICET. V.M.C Luquez agradece el financiamiento recibido del CONICET (PIP 0392) y la UNLP (PI A343). Gracias a Fabio Achinelli por la lectura crítica del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson L.P.; T.A. Volk; L.B. Smart & K. D. Cameron.** (2010). Shrub Willow Biomass Producer's Handbook. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. Disponible en: <https://www.esf.edu/willow/ProducersHandbook>.
- Achinelli, F.G.** (2007). Bases para el desarrollo de un sistema integrado de control de malezas en el establecimiento de plantaciones de *Populus* spp. del centro-norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. 196 pp. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/1818>. Último acceso: febrero 2022.
- Achinelli, F.G.; G.N. Doffo; A.J. Barotto; V.M.C. Luquez & S.E. Monteoliva.** (2018). Effects of irrigation, plantation density and genotype on woody biomass quality for bioenergy in a short rotation culture system with willows (*Salix* spp.). *Revista Árvore* 42(2): e420210.
- Agostini F.; A.S. Gregory & G. M. Richter.** (2015). Carbon Sequestration by Perennial Energy Crops: Is the Jury Still Out? *Bioenergy Research* 8:1057–1080.
- Albertsson J.; T. Verwijst; D. Hansson; N-O. Bertholdsson & I. Åhman.** (2014). Effects of competition between short-rotation willow and weeds on performance of different clones and associated weed flora during the first harvest cycle. *Biomass and Bioenergy* 70: 364-372.
- Almeida, P.; E. Proux-Wera; A. Churcher; L. Soler; J. Dainat; P. Pucholt; J. Nordlund; T. Martin; A.C. Rönnberg-Wästljung; B. Nystedt; S. Berlin & J.E. Manket.** (2020). Genome assembly of the basket willow, *Salix viminalis*, reveals earliest stages of sex chromosome expansion. *BMC Biology* 18:78.
- Alvarez, J.** (2018). Estabilidad productiva y plasticidad fenotípica de *Populus* spp. en relación con el contenido de agua y sales en el suelo en el Delta del Paraná, Argentina. Tesis doctoral. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 149 pp. Disponible en: <http://ri.agro.uba.ar/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=2018alvarezjavieralejandro>. Último acceso: julio 2021.
- Baettig, R.; M. Yáñez & M. Albornoz.** (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque* 31(2): 89-99.
- Bergante, S.; G. Facciotto & G. Minotta.** (2010). Identification of the main site factors and management intensity affecting the establishment of Short Rotation Coppice (SRC) in Northern Italy through stepwise regression analysis. *Central European Journal of Biology* 5(4): 522–530.
- Berhongaray, G.; M.S. Verlinden; L.S. Broeckx & R. Ceulemans.** (2015). Changes in belowground biomass after coppice in two *Populus* genotypes. *Forest Ecology and Management* 337: 1–10.

- Berhongaray, G.; F.M. Cotrufo; I.A. Janssens & R. Ceulemans.** (2019). Below-ground carbon inputs contribute more than above-ground inputs to soil carbon accrual in a bioenergy poplar plantation. *Plant and Soil* 434: 363–378.
- Berlin, S.; L. Ghelardini; L. Bonosi; M. Weih & A.C. Rönnerberg-Wastljung.** (2014). QTL mapping of biomass and nitrogen economy traits in willows (*Salix* spp.) grown under contrasting water and nutrient conditions. *Mol Breeding* 34:1987–2003.
- Berlin, S.; H.R. Hallingback; F. Beyer; N.E. Nordh; M. Weih & A.C. Ronnberg-Wastljung.** (2017). Genetics of phenotypic plasticity and biomass traits in hybrid willows across contrasting environments and years. *Annals of Botany* 120: 87–100.
- Berthod, N.; N.J.B. Brereton; F.E. Pitre & M. Labrecque.** (2015). Five willow varieties cultivated across diverse field environments reveal stem density variation associated with high tension wood abundance. *Frontiers in Plant Sciences* 6: 948.
- Borodowski, E.D.** (2017). Situación actual del cultivo y uso de las Salicáceas en Argentina. V Congreso Internacional de Salicáceas. 20 pp. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1eNX9a0bgeIHb5puAJfO0fdGo7XuSt4n1/view>. Último acceso: agosto 2020.
- Böhlenius, H. & R. Övergaard.** (2015). Growth response of hybrid poplars to different types and levels of vegetation control. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30(6): 516-525.
- Brereton, N.J.B.; F.E. Pitre; I. Shield; S.J. Hanley; M.J. Ray; R.J. Murphy & A. Karp.** (2014). Insights into nitrogen allocation and recycling from nitrogen elemental analysis and ¹⁵N isotope labelling in 14 genotypes of willow. *Tree Physiology* 34: 1252–1262.
- Buchman, D.; J. Jackson; W.E. Berguson; B.G. McMahon; N.D. Nelson; J. DuPlissis & G.E. Host.** (2020). Grower's Guide for Hybrid Poplar Plantations for Biomass Production. University of Minnesota Extension Report Number: NRR/ITR-2020/15. 15 pp. Disponible en: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/213759>. Último acceso: agosto 2020.
- Bustamante, J.; D. Funes; M. Clausen & M. Barbeito.** (2011). *Populus x canadensis* Conti 12 como fuente de energía. Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. 6 pp. Disponible en: <http://jornadasdesalicaceas2011.blogspot.com/p/trabajos-tecnicos.html>. Último acceso: agosto 2020.
- Cerrillo, T.; S. Loval; J. Grande; I. Fosco; J.M. Garcia Conde; R. Austin; M. García Cortés; C. Fuentes & M. Jouanny.** (2020). Selección de sauces arbóreos para aplicación en cultivos de corta rotación. XXXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre. Concordia, Argentina. Disponible en: <https://www.jornadasforestales.com.ar/book/2020.html>. Último acceso: Julio 2021.
- Chanoca, A.; L. de Vries & W. Boerjan.** (2019). Lignin Engineering in Forest Trees. *Frontiers in Plant Science* 10: 912.
- Christian, D.P.; G.J. Niemi; J.M. Hanowski & P. Collins.** (1994). Perspectives on biomass energy tree plantations and changes in habitat for biological organisms. *Biomass and Bioenergy* 6: 31-39.
- Clifton-Brown J.; A. Harfouche; M.D. Casler; H. Dylan Jones; W.J. Macalpine; D. Murphy-Bokern; L.B. Smart; A. Adler; C. Ashman; D. Awty-Carroll; C. Bastien; S. Bopper; V. Botnari; M. Brancourt-Hulmel; Z. Chen; L.V. Clark; S. Cosentino; S. Dalton; C. Davey; ... I. Lewandowski.** (2019). Breeding progress and preparedness for mass-scale deployment of perennial lignocellulosic biomass crops switchgrass, miscanthus, willow and poplar. *GCB Bioenergy* 11: 118-151.
- Dimitriou, I. & B. Mola-Yudego.** (2017). Impact of *Populus* Plantations on Water and Soil Quality. *Bioenergy Research* 10: 750–759.
- Dofo G.; F. Achinelli; M.E. Rodríguez & V.M.C. Luquez.** (2017a). Rendimiento de un sistema de rotación corta de alta densidad con *Salix* spp. en Buenos Aires, Argentina. *Bosque* 38(3): 587-592.
- Dofo, G.; S. Monteoliva; M.E. Rodríguez & V.M.C. Luquez.** (2017b). Physiological responses to alternative flooding and drought stress episodes in two willows (*Salix* spp.) clones. *Canadian Journal of Forest Research* 47: 174-182.
- Du Q.; C. Gong; Q. Wang; D. Zhou; H. Yang; W. Pan; B. Li & D. Zhang.** (2016). Genetic architecture of growth traits in *Populus* revealed by integrated quantitative trait locus (QTL) analysis and association studies. *New Phytologist* 209: 1067-1082.
- Eisenbies M.H.; T.A. Volk; J. Espinoza; C. Gantz, A. Himes; J. Posselius; R. Shuren; B. Stanton & Bruce Summers.** (2017). Biomass, spacing and planting design influence cut-and-chip harvesting in hybrid poplar. *Biomass and Bioenergy* 106: 182-190.

- Fabio, E.S & L.B. Smart.** (2018). Differential growth response to fertilization of ten elite shrub willow (*Salix* spp.) bioenergy cultivars. *Trees* 32: 1061-1072.
- FAO.** (2020). Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N°18. Buenos Aires, Argentina. 94 pp. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/ca8031es>. Último acceso: agosto 2020.
- Fichot, R.; F. Laurans; R. Monclus; A. Moreau; G. Pilate & F. Brignolas.** (2009). Xylem anatomy correlates with gas exchange, water-use efficiency and growth performance under contrasting water regimes: evidence from *Populus deltoides* x *Populus nigra* hybrids. *Tree Physiology* 29: 1537-1549.
- Forbes, E.; C. Johnston; J. Archer & A. McCracken.** (2017). SRC willow as a bioremediation medium for a dairy farm effluent with high pollution potential. *Biomass and Bioenergy* 105: 174-189.
- Fortier, J.; B. Truax; D. Gagnon & F. Lambert.** (2017). Linking Biomass Productivity to Genotype-Specific Nutrient Cycling Strategies in Mature Hybrid Poplars Planted Along an Environmental Gradient. *Bioenergy Research* 10: 876-890.
- Fritsche, S.; A.L. Klocko; A. Boron; A.M. Brunner & G. Thorlby.** (2018). Strategies for Engineering Reproductive Sterility in Plantation Forests. *Frontiers in Plant Science* 9: 1671.
- Ghelardini, L.; S. Berlin; M. Weih; U. Lagercrantz; N. Gyllenstrand & A.C. Rönnerberg-Wästljung.** (2014). Genetic architecture of spring and autumn phenology in *Salix*. *BMC Plant Biology* 14: 31.
- Gregory A.S.; J.A.J. Dungait; I.F. Shield; W.J. Macalpine; J. Cunniff; M. Durenkamp; R.P. White; A. Joynes & G.M. Richter.** (2018). Species and Genotype Effects of Bioenergy Crops on Root Production, Carbon and Nitrogen in Temperate Agricultural Soil. *BioEnergy Research* 11: 382-397.
- Guarnaschelli A.B.; A.M. Garau; S.C. Cortizo; J. Alvarez & J.H. Lemcoff** (2011). Respuestas diferenciales a la sequía en clones de *Populus deltoides* cultivados en el Delta del Paraná. Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina, "Los álamos y los sauces junto al paisaje y el desarrollo productivo de la Patagonia". Jornada de Salicáceas, 16-19 de Marzo. Neuquén, Argentina. Disponible en: <http://jornadasdesalicaceas2011.blogspot.com/p/trabajos-tecnicos.html>. Último acceso: julio 2021.
- Han Q.; H. Harayama; A. Uemura; E. Ito; H. Utsugi; M. Kitao & Y. Maruyama.** (2020). High biomass productivity of Short-Rotation willow plantation in boreal Hokkaido achieved by mulching and cutback. *Forests* 11: 505.
- Hanley, S.J. & A. Karp.** (2014). Genetic strategies for dissecting complex traits in biomass willows (*Salix* spp.). *Tree Physiology* 34: 1167-1180.
- Intergovernmental panel on climate change. IPCC.** (2014). Climate change 2014 Synthesis Report. 169 pp. Disponible en: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Último acceso: agosto 2020.
- Jorge, V.; A. Dowkiw; P. Faivre-Rampant & C. Bastien.** (2005). Genetic architecture of qualitative and quantitative *Melampsora larici-populina* leaf rust resistance in hybrid poplar: genetic mapping and QTL detection. *New Phytologist* 167: 113-127.
- Karp, A. & I. Shield.** (2008). Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist* 179: 15-32.
- Karp, A.; S.J. Hanley; S.O. Trybush; W. Macalpine; M. Pei & I. Shield.** (2011). Genetic Improvement of Willow for Bioenergy and Biofuels. *Journal of Integrative Plant Biology* 53(2): 151-165.
- Keoleian, G.A. & T.A. Volk.** (2005). Renewable Energy from Willow Biomass Crops: Life Cycle Energy, Environmental and Economic Performance. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24: 385-406.
- Krzyżaniak, M.; M.J. Stolarski; S. Szczukowski & J. Tworkowski.** (2016). Life Cycle Assessment of New Willow Cultivars Grown as Feedstock for Integrated Biorefineries. *Bioenergy Research* 9: 224-238.
- Kulig, B.; E. Gacek; R. Wojciechowski; A. Oleksy; M. Kołodziejczyk; W. Szewczyk & A. Klimek-Kopyra.** (2019). Biomass yield and energy efficiency of willow depending on cultivar, harvesting frequency and planting density. *Plant, Soil and Environment* 65.
- Kuzovkina, Y. & T.A. Volk.** (2009). The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: coordination of structure, function and autoecology. *Ecological Engineering* 35: 1178-1189.
- Liu, N.; S. Larsen; U. Jorgensen; D. Murach; C. Pflugmacher; H. Hartmann & P.E. Laerke.** (2017). Combustion quality of poplar and willow clones grown as SRC in four sites in Brandenburg, Germany. *Biomass and Bioenergy* 106: 51-62.

- Luke Williams, C.; T.L. Westover; R.M. Emerson; J.S. Tumuluru & C. Li.** (2016). Sources of Biomass Feedstock Variability and the Potential Impact on Biofuels Production. *Bioenergy Research* 9: 1-14.
- Luquez, V.M.C.; F. Achinelli & S. Cortizo.** (2012). Evaluation of flooding tolerance in cuttings of *Populus* clones used for forestation at the Paraná River Delta, Argentina. *Southern Forests* 74: 61-70.
- Luquez, V.M.C; T. Cerrillo & M.E. Rodríguez.** (2018). Tolerancia a la inundación en sauces plantados en la Argentina: conocimiento actual y perspectivas. *Revista de la Facultad de Agronomía* 117(1): 89-98.
- Meiresonne, L.; A. De Schrijver & B. De Vos.** (2007). Nutrient cycling in a poplar plantation (*Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* 'Beaupré') on former agricultural land in northern Belgium. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 141-155.
- Mosseler, A.; J.E. Major & M. Labrecque.** (2014). Genetic by environment interactions of two North American *Salix* species assessed for coppice yield and components of growth on three sites of varying quality. *Trees* 28: 1401-1411.
- Naidoo, S.; B. Slippers; J.M. Plett; D. Coles & C.N. Oates.** (2019). The Road to Resistance in Forest Trees. *Frontiers in Plant Science* 10: 273.
- Nelson, N.D.; R. Meilan; W.E. Berguson; B.G. McMahon; M. Cai & D. Buchman.** (2019). Growth performance of hybrid poplar clones on two agricultural sites with and without early irrigation and fertilization. *Silvae Genetica* 68: 58-66.
- Niemczyk, M.** (2021). The effects of cultivar and rotation length (5 vs. 10 years) on biomass production and sustainability of poplar (*Populus* spp.) bioenergy plantation. *GCB-Bioenergy* 13(6): 999-1014.
- Niemczyk, M.; Y. Hu & B.R. Thomas.** (2019). Selection of Poplar Genotypes for Adapting to Climate Change. *Forest* 10: 1041.
- Nissim, W.G.; F.E. Pitre; T.I. Teodorescu & M. Labrecque.** (2013). Long-term biomass productivity of willow bioenergy plantations maintained in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy* 56: 361-369.
- Njakou Djomo S.; A. Ac; T. Zenone; T. De Groote; S. Bergante; G. Facciotto; H. Sixto; P. Ciria Ciria; J. Weger & R. Ceulemans.** (2015). Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 845-854.
- Nord-Larsen, T.; L. Sevel & K. Raulund-Rasmussen.** (2015). Commercially Grown Short Rotation Coppice Willow in Denmark: Biomass Production and Factors Affecting Production. *Bioenergy Research* 8: 325-339.
- Novaes, E.; L. Osorio; D.R. Drost; B.L. Miles; C.R.D Boaventura-Novaes; C. Benedict; C. Dervinis; Q. Yu; R. Sykes; M. Davis; T.A. Martin; G.F. Peter & M. Kirst.** (2009). Quantitative genetic analysis of biomass and wood chemistry of *Populus* under different nitrogen levels. *New Phytologist* 182: 878-890.
- Porsö, C. & P.A. Hansson.** (2014). Time-dependent climate impact of heat production from Swedish willow and poplar pellets – In a life cycle perspective. *Biomass and Bioenergy* 70: 287-301.
- Quaye, A. & T. Volk.** (2013). Biomass production and soil nutrients in organic and inorganic fertilized willow biomass production systems. *Biomass and Bioenergy* 57: 113-125.
- Quiñones Martorello, A.S.; J.E. Gyenge & M.E. Fernández.** (2017). Morpho-physiological response to vertically heterogeneous soil salinity of two glycophyte woody taxa, *Salix matsudana* x *S. alba* and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. *Plant and Soil* 416: 343-360.
- Quiñones Martorello, A.S.; M.E. Fernandez; M.G. Monterubbianesi; M.E. Colabelli; P. Laclau & J. Gyenge.** (2020). Effect of combined stress (salinity + hypoxia) and auxin rooting hormone addition on morphology and growth traits in six *Salix* spp. clones. *New Forests* 51: 61-80.
- Rae, A.M.; N.R. Street; K.M. Robinson; N. Harris & G. Taylor.** (2009). Five QTL hotspots for yield in short rotation coppice bioenergy poplar: The Poplar Biomass Loci. *BMC Plant Biology* 9(23).
- Rodríguez, M.E. & V.M.C. Luquez.** (2016). Poplars and Willows Responses to Flooding Stress. En: *Poplars and willows: cultivation, applications and environmental benefits*. Madeline V. Desmond, Ed. Nova Science Publisher, New York. pp. 103-130.
- Rodrigues, A.; S.P.P. Vanbeveren; M. Costa & R. Ceulemans.** (2017). Relationship between soil chemical composition and potential fuel quality of biomass from poplar short rotation coppices in Portugal and Belgium. *Biomass and Bioenergy* 105: 66-72.

- Rodríguez, M.E.; I. Mozo; S. Cortizo; E.P. Cappa & V.M.C Luquez.** (2021). Early rooting and flooding tolerance in cuttings from a *Populus deltoides* full-sib family under greenhouse conditions. *Canadian Journal of Forest Research* 51(5): 732-741.
- Rönnerberg-Wästljung, A.C.; B. Samils; V. Tsarouhas & U. Gullberg.** (2008). Resistance to *Melampsora larici-epitea* leaf rust in *Salix*: analyses of quantitative trait loci. *Journal of Applied Genetics* 49(4): 321-331.
- Samils, B.; A.C. Rönnerberg-Wästljung & J. Stenlid.** (2011). QTL mapping of resistance to leaf rust in *Salix*. *Tree Genetics & Genomes* 7: 1219-1235.
- Sannihagri, P.; A. Ragauskas & G. Tuskan.** (2010). Poplar as a feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 4: 209-226.
- Schmidt-Walter, P. & N. P. Lamersdorf.** (2012). Biomass Production with Willow and Poplar Short Rotation Coppices on Sensitive Areas—the Impact on Nitrate Leaching and Groundwater Recharge in a Drinking Water Catchment near Hanover, Germany. *Bioenergy Research* 5: 546-562.
- Schulz, V.; M. Gauder; F. Seidl; K. Nerlich; W. Claupein & S. Graeff-Hönninger.** (2016). Impact of different establishment methods in terms of tillage and weed management systems on biomass production of willow grown as short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* 85: 327-334.
- Serapiglia, M.; M. Humiston; H. Xu; D. Hogsett; R. Mira de Orduña; A. Stipanovic & L. Smart.** (2013). Enzymatic saccharification of shrub willow genotypes with differing biomass composition for biofuel production. *Frontiers in Plant Science* 4: 57.
- Sevel, L.; T. Nord-Larsen & K. Raulund-Rasmussen.** (2012). Biomass production of four willow clones grown as short rotation coppice on two soil types in Denmark. *Biomass and Bioenergy* 46: 664-672.
- Shoostarian, A.; J.A. Anderson; G.W. Armstrong & M.K. Luckert.** (2018). Growing hybrid poplar in western Canada for use as a biofuel feedstock: A financial analysis of coppice and single-stem management. *Biomass and Bioenergy* 113: 45-54.
- Solomon, B.D.; J.R. Barnes & K.E. Halvorsen.** (2007). Grain and cellulosic ethanol: history, economics and energy policy. *Biomass and Bioenergy* 31: 416-425.
- Stanton, B.J.; K. Haiby; C. Gantz; J. Espinoza & R.A. Shuren.** (2021). The practice and economics of hybrid poplar biomass production for biofuels and bioproducts in the Pacific Northwest. *Bioenergy Research* 14: 543-560.
- Štochllová, P.; K. Novotná; M. Costa & A. Rodrigues.** (2019). Biomass production of poplar short rotation coppice over five and six rotations and its aptitude as a fuel. *Biomass and Bioenergy* 122: 183-192.
- Stolarski, M.J.; S. Szczukowski; J. Tworkowski; M. Krzyżaniak & D. Załuski.** (2018). Willow production during 12 consecutive years—The effects of harvest rotation, planting density and cultivar on biomass yield. *GBC-Bioenergy*. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12583>. Último acceso: agosto 2020.
- Studer, M.E.; J.D. De Martini; M.F. Davis; R.W. Sykes; B. Davison; M. Keller, G.A. Tuskan & C.E. Wyman.** (2011). Lignin content in natural *Populus* variants affects sugar release. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(15): 6300-6305.
- Tharakan, P.J.; T.A. Volk; L.P. Abrahamson & E.H. White.** (2003). Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass and Bioenergy* 25(6): 571-580.
- Thijs, S.; N. Witters; J. Janssen; A. Ruttens; N. Weyens; R. Herzig; M. Mench; S. Van Slycken; E. Meers; L. Meiresonne & J. Vangronsveld.** (2018). Tobacco, Sunflower and High Biomass SRC Clones Show Potential for Trace Metal Phytoextraction on a Moderately Contaminated Field Site in Belgium. *Frontiers in Plant Science* 9: 1879.
- Toillon, J.; B. Rollin; E. Dalle; M. Feinard-Duranceau; J.C. Bastien; F. Brignolas & N. Marron.** (2013). Variability and plasticity of productivity, water-use efficiency, and nitrogen exportation rate in *Salix* short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* 56: 392-404.
- Tucat, C.; S. Romagnoli; E. Thomas & T. Cerrillo.** (2016). Use of treated wastewater in forests plantations of North Patagonia, Argentina. 25th Session of the International Poplar Commission. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/ipc2016/92288/en/>. Último acceso: agosto 2020.
- Tullus, A.; L. Rytter; T. Tullus; M. Weih & H. Tullus.** (2012). Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. x *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(1): 10-29.
- Uasuf, A. & G. Becker.** (2011). Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy* 35: 1357-1366.

- Uasuf A. & J. Hilbert.** (2012). El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina. INTA. Informes Técnicos Bioenergía, Año 1 N° 3. Buenos Aires, Argentina. 53 pp. Disponible en:
- Valentine, J.; J. Clifton-Brown; A. Hastings; P. Robson; G. Allison & P. Smith.** (2012). Food vs. fuel: the use of land for lignocellulosic 'next generation' energy crops that minimize competition with primary food production. *GCB Bioenergy* 4: 1-19.
- Vanbeverem, S.P.P. & R. Ceulemans.** (2018). Genotypic differences in biomass production during three rotations of short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* 119: 198–205.
- Vanbeverem, S.P.P.; J. Schweier; G. Berhongaray & R. Ceulemans.** (2015). Operational short rotation woody crop plantations: Manual or mechanised harvesting? *Biomass and Bioenergy* 72: 8-18.
- Vanholme, B.; T. Desmet; F. Ronsse; K. Rabaey; F. Van Breusegem; M. De Mey; W. Soetaert & W. Boerjan.** (2013). Towards a carbon-negative sustainable bio-based economy. *Frontiers in Plant Science* 4: 174.
- Verlinden, M.S.; L.S. Broeckx; J. Van den Bulcke; J. Van Acker & R. Ceulemans.** (2013). Comparative study of biomass determinants of 12 poplar (*Populus*) genotypes in a high-density short rotation culture. *Forest Ecology & Management* 307: 101-111.
- Verwijst, T.; A. Lundkvist; S. Edelfeldt & J. Albertsson.** (2013). Development of Sustainable Willow Short Rotation Forestry in Northern Europe. En: *Biomass Now - Sustainable Growth and Use*. Miodrag Darko Matovic. Ed. IntechOpen Book Series, London. pp. 479-502. Disponible en <https://www.intechopen.com/chapters/44392>. Último acceso febrero 2022.
- Volk, T.A.; L.P. Abrahamson; C.A. Nowak; L.B. Smart; P.J. Tharakan & E.H. White.** (2006). The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *Biomass and Bioenergy* 30: 715-727.
- Wang, G.; Y. Dong; X. Liu; G. Yao; X. Yu & M. Yang.** (2018). The Current Status and Development of Insect-Resistant Genetically Engineered Poplar in China. *Frontiers in Plant Science* 9: 1408.
- Wang, M.; L. Zhang; Z. Zhang; M. Li; D. Wang; X. Zhang; Z. Xi; K. Keefover-Ring; L.B. Smart; S.P. Di Fazio; M.S. Olson; T. Yin; J. Liu & T. Ma.** (2020). Phylogenomics of the genus *Populus* reveals extensive interspecific gene flow and balancing selection. *New Phytologist* 225: 1370-1382.
- Weih, M.** (2004). Intensive short rotation forestry in boreal climates: present and future perspectives. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1369-1378.
- Weih, M.; A. Karacic; H. Munkert; T. Verwijst & M. Diekmann.** (2003). Influence of young poplar stands on floristic diversity in agricultural landscapes (Sweden). *Basic and Applied Ecology* 4: 149-156.
- Wikberg, J. & E. Ögren.** (2007). Variation in drought resistance, drought acclimation and water conservation in four willows cultivars used for biomass production. *Tree Physiology* 27: 1339-1346.
- Wullschleger, S.D.; F.C. Meinzer & R.A. Vertessy.** (1998). A review of whole-plant water use studies in tree. *Tree Physiology* 18: 499-512.
- Yáñez, M.A.; F. Zamudio; S. Espinoza; M. Ivković; F. Guerra; C. Espinosa & R.M. Baettig.** (2019). Genetic variation and growth stability of hybrid poplars in high-density short-rotation coppice stands in central Chile. *Biomass and Bioenergy* 120: 84-90.
- Ye, X.; V. Busov; N. Zhao; R. Meilan; L.M. McDonnell; H.D. Coleman; S.D. Mansfield; F. Chen; Y. Li & Z. Cheng.** (2011). Transgenic *Populus* Trees for Forest Products, Bioenergy, and Functional Genomics. *Critical Reviews in Plant Sciences* 30: 415-434.