

Mejora genética de los cultivos de sauce (*Salix* spp.) con fines bioenergéticos y medioambientales en los Estados Unidos

L.B. Smart, T.A. Volk, J. Lin, R.F. Kopp, I.S. Phillips, K.D. Cameron, E.H. White y L.P. Abrahamson

Un programa de mejora del sauce se propone acelerar el crecimiento, optimizar las características pertinentes y reducir los costos de producción en beneficio de la viabilidad a largo plazo de los sistemas de cultivo del sauce para la producción de energía, restaurando tierras degradadas y mejorando la calidad del agua.

Los arbustos de sauce (*Salix* spp.) de crecimiento rápido pueden ser objeto de mejora y selección para su uso como cultivos energéticos destinados a largo plazo a sustituir a los combustibles fósiles en regiones templadas. También pueden ser seleccionados para diversas aplicaciones aparte de la bioenergía, tales como fitorremediación, ordenación de nutrientes, setos vivos contra la nieve y estabilización de riberas fluviales. Sin embargo, pese a su notable potencial para producir bioenergía y estimular el desarrollo rural (Volk *et al.*, 2004), todavía no se les ha prestado mucha atención en los Estados Unidos, por su costo de producción elevado en comparación con los combustibles fósiles actualmente utilizados (Tharakan *et al.*, 2005). El desarrollo de nuevos clones de sauce puede reducir el costo de su cultivo aumentando el rendimiento de biomasa y optimizando la química de la madera con bajos insumos para pretratamiento, fraccionamiento y conversión en las biorrefinerías.

El programa de mejora del Colegio de Ciencia Medioambiental y Silvicultura de la Universidad del Estado de Nueva York (*College of Environmental Science and Forestry of the State University of New York, SUNY-ESF*), el mayor de América del Norte, tiene más de 730 accesiones recolectadas de la naturaleza en los Estados Unidos y suministradas por colaboradores internacionales. En este artículo se describe el trabajo de cultivo controlado realizado en el SUNY-ESF, que ha producido algunos cruzamientos mejorando el crecimiento del 20 al 40 por ciento respecto al de un cultivar normal. Los autores creen que estos resultados, si se confirman con pruebas regionales a largo plazo, pueden estimular la generalización del cultivo del sauce en los Estados Unidos.

CULTIVOS DE ARBUSTO DE SAUCE DE CICLO CORTO

Las plantaciones de biomasa de sauce se establecen de manera fácil y eficiente a partir de esquejes mediante sistemas mecánicos. Pronto desarrollan un sistema difuso de raíces dominado por finas raicillas. Los arbustos responden a la poda tras la primera temporada de crecimiento multiplicando los brotes en la segunda temporada. La biomasa leñosa sobre el nivel del terreno se recolecta durante la estación de letargo cada de tres o cuatro años utilizando una cosechadora de forraje mecánica con un cabezal cortador especial. Tras la recolección, se añade un poco de fertilizante nitrogenado para mantener la riqueza del suelo y estimular el crecimiento. En la primavera siguiente a cada recolección, la cepa del sauce responde produciendo numerosos brotes nuevos, iniciando un nuevo ciclo de crecimiento hasta la recolección a los tres o cuatro años. Este ciclo puede repetirse seis a ocho veces antes de que se precise renovar las cepas.

En el noreste de los Estados Unidos, las plantaciones se han hecho con clones de sauce seleccionados por su resistencia a la roya y a los ataques de ciervos, conejos e insectos, que son sus principales amenazas. En otras partes del mundo se utilizan sistemas forestales análogos de rotación corta basados en la poda, sirviéndose de especies distintas del sauce adaptadas a las condiciones locales.

APLICACIONES Bioenergía

Varias tecnologías pueden utilizarse para convertir la biomasa del sauce en electricidad y calor. Puede quemarse la biomasa junto con otras materias leñosas y con carbón para generar electricidad

Lawrence B. Smart, Juan Lin, Richard F. Kopp, Ingrid S. Phillips y Kimberly D. Cameron están en el Departamento de Biología Medioambiental y Forestal, y **Timothy A. Volk y Edwin H. White** están en el Departamento de Ordenación de Recursos Forestales y Naturales, del Colegio de Ciencia Medioambiental y Silvicultura de la Universidad del Estado de Nueva York, Syracuse, Nueva York (Estados Unidos). **Lawrence P. Abrahamson** está asociado a ambos departamentos.



Plantación de sauce sobre un cultivo de cobertura invernal de centeno utilizando un tractor equipado con plantadora mecánica

en centrales de turbina de vapor. Si se sustituye el 10 al 15 por ciento del carbón con biomasa de sauce, se reducen las emisiones de azufre y nitrógeno en una proporción casi equivalente. La biomasa de sauce puede quemarse también con otros fragmentos de madera en pequeños hornos para generar energía o vapor, o ambas cosas, para calefacción comercial o residencial regional. Nuevas tecnologías permitirán una conversión más eficiente de la energía en pequeños generadores o microturbinas diesel o de encendido por chispa accionadas por gasificador.

Como el carbono emitido durante la combustión de la biomasa de sauce ha sido capturado de la atmósfera durante el crecimiento del sauce en los tres años anteriores—a diferencia del carbono liberado por la combustión del carbón, que fue capturado y fosilizado hace millones de años—no aumenta el bióxido de carbono atmosférico con la producción de energía a partir de la biomasa de sauce. El rendimiento energético es bueno: por cada unidad de energía de combustible fósil utilizada para cultivar, transportar y convertir el sauce en electricidad, se producen de 11 a 16 unidades de energía aprovechable (Heller, Keoleian y Volk, 2003).

Las inversiones en investigación y desarrollo están produciendo métodos eficientes para la extracción y la conversión a partir de la madera de hemicelulosa y celulosa que pueden convertirse en etanol para combustible u otros productos actualmente derivados del petróleo.

Ingeniería medioambiental

Los arbustos de sauce, como especie pionera, se adaptan bien a terrenos áridos y funcionan bien en la fitorremediación.

Sus tasas relativamente altas de transpiración y su resistencia a inundaciones estacionales, con sus raíces que se extienden varios metros por el terreno, son ventajas particularmente en tierras húmedas, donde el control de la escorrentía freática es esencial para reducir la contaminación. Los sauces utilizados para acumular metales pesados del suelo pueden quemarse en centrales térmicas; los metales pesados se concentran en las cenizas para ser eliminados.

Arbustos de sauce nativos y naturalizados pueden utilizarse también para mejorar la calidad del agua y mantener o restaurar ecosistemas ribereños. Con su crecimiento rápido y sus ciclos cortos, pueden absorber el exceso de nitrógeno y de fósforo derivado de las actividades agrícolas (Adegbidi *et al.*, 2001). Algunos de estos nutrientes se retiran del sistema con la recolección, y el rápido rebrote después de la poda requiere altas tasas de absorción de nutrientes. Sus sistemas de raíces dispersas, extensas y perennes impiden la erosión del suelo en las riberas, y los arbustos ofrecen un hábitat para la fauna y amenizan el paisaje.

Una aplicación en auge es el uso de arbustos de sauce como setos vivos corta-

nieves en carreteras expuestas al viento. Los sauces detienen la nieve llevada por el viento, mejorando el estado de las carreteras y reduciendo los costos y los efectos medioambientales derivados del uso repetido de maquinaria o productos químicos contra la nieve.

MEJORA GENÉTICA DE LOS CULTIVOS DE SAUCE PARA EL NORDESTE Y EL MEDIO OESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS

Características deseadas de los clones mejorados

Los objetivos a largo plazo del programa del SUNY-ESF son la producción regular de nuevas familias de arbustos de sauce mediante la mejora genética y la selección de clones mejorados con características particulares que los hagan adecuados para aplicaciones prácticas específicas (Kopp *et al.*, 2001).

Para comercializar en gran escala plantaciones destinadas a la bioenergía, los clones deben producir altos rendimientos en terrenos diversos durante muchos años para reducir el costo de la producción de biomasa. El SUNY-ESF busca clones cuya química de la madera sea óptima para el pretratamiento, la separación de los componentes de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina) y la conversión en biocombustibles en las biorrefinerías.

Para las aplicaciones de ingeniería medioambiental, como la limpieza de suelos contaminados y el control de la escorrentía de nutrientes, se seleccionan sauces nativos y naturalizados activos en la absorción de metales pesados, resistentes a microbios que puedan degradar contaminantes orgánicos, con altas tasas de transpiración para el control hidrológico, y con abundantes raíces para estabilizar el suelo y absorber el exceso de nitrógeno y de fósforo producido por los



Prueba de un sistema de recolección del sauce utilizando una cosechadora mecánica de forraje con un cabezal cortador modificado

fertilizantes agrícolas o las aguas residuales. Las pocas investigaciones hechas hasta ahora sobre el uso del sauce para la fitorremediación de metales pesados sugieren que hay grandes variaciones en la capacidad de las especies de *Salix* y en las especies híbridas para absorber metales (Landberg y Greger, 2002; Pulford, Riddell-Black y Stewart, 2002; Vyslouzilova *et al.*, 2003). Es muy probable que haya una gran variación genética entre clones de *Salix* respecto a su capacidad para ocupar diferentes tipos de suelos contaminados y para promover la fitorremediación. Los clones tienen asimismo diversas tasas de transpiración (Weih y Nordh, 2002), lo que es importante para el control hidrológico del agua freática contaminada. La selección de clones de *Salix* para varias aplicaciones relacionadas con la fitorremediación puede hacerse con miras a terrenos particulares y a objetivos específicos.

Una colección de diversidad genética para el mejoramiento

El programa del SUNY-ESF colecciona clones genéticamente diversos procedentes del nordeste y del medio oeste de los Estados Unidos. Colaboradores de China, Japón, Canadá, Nueva Zelanda, Ucrania y Suecia han aportado accesiones a la colección. La colección ha adquirido también varios clones de viveros comerciales. Desde 1994, el SUNY-ESF ha conseguido más de 730 accesiones de *Salix* spp., la mayoría recolectadas y propagadas a partir de plantas en su hábitat natural. Las especies más comunes de la colección son *S. eriocephala*, *S. purpurea* y *S. nigra* (véase el Cuadro). Se observan regularmente las características de estas plantas como número y diámetro de tallos, altura, vulnerabilidad a enfermedades y daños causados por las plagas. Se considera también la forma de crecimiento, ya que el crecimiento vertical y compacto es óptimo para la recolección mecánica. Como el sauce es planta dioica (produce flores masculinas o femeninas en pies separados), se determina el sexo de cada pie. A partir de estos datos, se seleccionan las plantas utilizadas para cruzamientos controlados. Se utiliza tecnología genética molecular basada en la variación de secuencias de ADN para comprobar la diversidad genética de las accesiones

Rebrotes de nuevos tallos de las cepas de *Salix eriocephala* en la primavera siguiente a la recolección de invierno



L. SMART

de la colección, para identificar clones específicos y como ayuda para la identificación de especies.

Una colección que sirva de apoyo a un programa de mejora genética a largo plazo debe contener la mayor diversidad genética posible. Dos de las especies importantes del programa del SUNY-ESF son *S. eriocephala*, nativa del nordeste de Estados Unidos, y *S. purpurea*, introducida en Estados Unidos hace más de 200 años por colonos europeos para fabricar cestas. Para caracterizar la diversidad de las poblaciones de donde se han tomado ejemplares para la colección del vivero, los investigadores han recogido muestras de más de 1 000 ejemplares de estas dos especies que crecen a lo largo de los ríos en el estado de Nueva York y han analizado la variación genética. Los análisis moleculares revelan que aunque las poblaciones naturales de ambas especies son muy diversas, las variaciones de la especie nativa, *S. eriocephala*, tienen mayor diversidad genética que las de la introducida *S. purpurea*. De hecho, algunas poblaciones de esta especie naturalizada constan de individuos del mismo clon que se han establecido por propagación vegetativa (J. Lin y L.B. Smart, datos inéditos). Una vez terminados, estos análisis indicarán si las colecciones constituidas para establecer un vivero de mejora han recogido una subserie adecuada de la diversidad genética natural.

Además de comprobar la diversidad genética a nivel de la población, los investigadores del SUNY-ESF han recogido datos sobre transmisión hereditaria de algunas características básicas de la *S. eriocephala*. Las mediciones en pruebas repetidas han indicado que la transmisión hereditaria es baja o moderada para

características importantes para la producción de biomasa (Phillips, 2002). Los resultados indican que si se usan para los cruzamientos clones de alto rendimiento, hay buenas probabilidades de que la descendencia tendrá también un alto rendimiento gracias a los genes heredados. Las medias familiares de la descendencia de primera generación suelen ser mayores que las medias parentales, lo que indica que las polinizaciones controladas pueden dar lugar a híbridos fuertes. Estudios de invernadero y de campo de la descendencia de segunda generación no revelan una depresión endogámica apreciable. En conjunto, estos resultados muestran que pueden realizarse mejoras regulares incrementando el rendimiento de la *S. eriocephala* mediante cruzamiento controlado y selección (Phillips, 2002).

Polinización controlada e hibridación

Se han desarrollado técnicas para la extracción del polen de sauce (Kopp *et al.*, 2002), y desde 1998 se ha procedido

Número de accesiones de especies de *Salix* más representadas en la colección de mejora genética del SUNY-ESF

Especies de <i>Salix</i>	Número de accesiones
<i>S. alba</i>	16
<i>S. bebbiana</i>	12
<i>S. candida</i>	4
<i>S. cordata</i>	7
<i>S. discolor</i>	7
<i>S. eriocephala</i>	296
<i>S. exigua</i>	8
<i>S. lucida</i>	26
<i>S. miyabeana</i>	11
<i>S. nigra</i>	95
<i>S. purpurea</i>	131
<i>S. sachalinensis</i>	12

a la polinización controlada en el SUNY-ESF. Los cruzamientos realizados en 1998 y 1999 para producir nuevos cultivos de alto rendimiento destinados a plantaciones bioenergéticas generaron más de 2 000 unidades, que se plantaron en campos de estudio para evaluar el rendimiento, la forma y la resistencia a plagas. Medidos los tallos al final de la primera época de crecimiento tras la poda, muchos de los ejemplares habían alcanzado 3 metros y superaban a sus hermanos, siendo su desviación de la media más que normal (véase la Figura). Híbridos de *S. miyabeana* con *S. sacchalimensis*, *S. purpurea* y *S. viminalis* han dado descendencia con un crecimiento superior en el 120 al 150 por ciento al del clon estándar de *S. dasyclados* (SV1) en pruebas de selección repetidas. Híbridos intraespecíficos de *S. purpurea* han mejorado también espectacularmente respecto a las medias parentales. Como un aumento del 20 por ciento en el rendimiento en biomasa de los cultivos de sauce reduce el costo de la biomasa suministrada en un 13 por ciento (Tharakan *et al.*, 2005), estos éxitos promoverán la viabilidad económica de la producción de energía a partir del sauce.

Se están haciendo pruebas para seleccionar una subserie de los clones de sauce más prometedores para otros usos diversos. Según los resultados iniciales, los clones que producen más biomasa no son necesariamente los mejores para otras aplicaciones. En las selecciones

futuras se tendrán en cuenta características más variadas, para identificar clones adecuados para los muchos usos de los arbustos de sauce.

PERSPECTIVAS PARA LA ADOPCIÓN GENERALIZADA DEL CULTIVO DEL SAUCE EN LOS ESTADOS UNIDOS

En los Estados Unidos, años de investigación y desarrollo y de experimentación han promovido el sistema de producción de biomasa de sauce, han ayudado a cuantificar sus beneficios para el medio ambiente y el desarrollo rural, han demostrado su aplicabilidad a varios sistemas de conversión y han conducido a nuevas políticas que incorporan los cultivos dedicados a la energía como una de las fuentes de energía renovable. Subsisten no obstante obstáculos, entre ellos la falta de inversiones de capital y de voluntad decidida de utilizar la biomasa del sauce para producir calor y energía. De estos obstáculos resulta un riesgo excesivo para los eventuales cultivadores de sauces como fuente de energía.

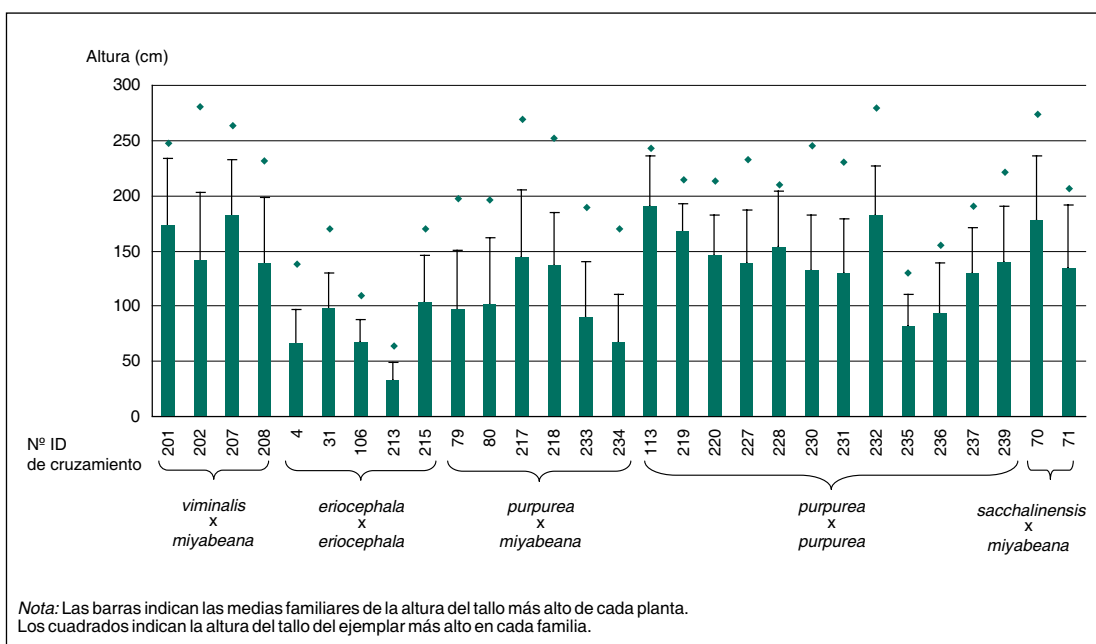
Las investigaciones en el SUNY-ESF siguen orientadas a rebajar de los costos de producción y demostrar la viabilidad a largo plazo de los cultivos de sauces. Se están haciendo pruebas para comprobar los mayores rendimientos en plantaciones a escala comercial con nuevos clones del programa de mejora. La confluencia de varios factores –mayores rendimien-

tos conseguidos, recientes revisiones de políticas que permiten a los agricultores de algunas regiones de Estados Unidos cultivar y recolectar sauces en tierras reservadas al programa de conservación, créditos por impuestos federales y estatales y subidas en los precios de los combustibles fósiles– ha hecho que los cultivos de biomasa de sauce alcancen el punto de viabilidad económica.

La utilización de arbustos de sauce para la fitorremediación dependerá de que los datos obtenidos a largo plazo de proyectos de demostración y ensayos acrediten el éxito de la limpieza y la restauración de suelos contaminados con muy bajo costo. Si se puede convencer a ingenieros consultores, administradores y operarios municipales de que estos sistemas son seguros y efectivos, la economía impulsará ampliamente el uso de los sistemas de fitorremediación basados en el sauce.

La generalización de los cultivos de sauce requerirá un esfuerzo meditado y efectivo de información para productores y consumidores potenciales, inversiones empresariales y una opción de toda la comunidad por la energía renovable y sostenible de la biomasa. ♦

Medias familiares de las alturas de los tallos tras el primer año de poda de clones obtenidos por cruzamiento controlado



Selección de clones de sauce que crecerán con fuerza en una tierra con vertidos industriales

Los arbustos de sauce pueden desempeñar un papel importante en un terreno muy necesitado de restauración medioambiental cerca de Syracuse, Nueva York (Estados Unidos). El terreno contiene grandes volúmenes de desechos generados por el método Solvay para la producción de ceniza de sosa (carbonato sódico) para la manufactura de vidrios y lejías. El método Solvay utiliza sal y piedra caliza y produce cloruro cálcico como subproducto de desecho. Gran parte de los desechos de funcionamiento de la fábrica Solvay se depositaron de 1887 a 1986 como cieno en grandes vertederos próximos al lago Onondaga. Las acumulaciones resultantes tienen altas concentraciones de pH y sal. Actualmente, se filtran sales de los vertidos de Solvay hasta arroyos próximos y el lago Onondaga, lo que da lugar a niveles anormalmente altos de cloruro y calcio que perturban considerablemente el ecosistema lacustre.

Los arbustos de sauce son una de las especies leñosas pioneras establecidas en estas difíciles condiciones (Hewlett, 1956). Se está probando la capacidad de densas plantaciones de sauces sobre los materiales de desecho, aumentados con varias sustancias orgánicas, para reducir o eliminar la filtración de agua a través de los vertidos, mediante la interceptación de las precipitaciones, la mayor evapotranspiración y la mayor capacidad de retención de la humedad del suelo. La selección inicial de 38 clones de álamo sobre material de vertidos en invernaderos y campos de pruebas ha permitido observar que hay diferencias notables entre los clones respecto al crecimiento por encima y por debajo del nivel del terreno. Varios clones producidos mediante cruzamientos controlado en el SUNY-ESF produjeron más biomasa que un cultivar normal, clon SV1 de *S. dasyclados*.

Weih, M. y Nordh, N.E. 2002. Characterising willows for biomass and phytoremediation: growth, nitrogen and water use of 14 willow clones under different irrigation and fertilisation regimes. *Biomass and Bioenergy*, 23: 397-413. ♦



Bibliografía

- Adegbidi, H.G., Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., Briggs, R.D. y Bickelhaupt, D.H. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*, 20: 399-411.
- Heller, M.C., Keoleian, G.A. y Volk, T.A. 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*, 25: 147-165.
- Hewlett, J.D. 1956. *The development of vegetation on the Solvay waste beds*. M.S. thesis. Syracuse, Nueva York, Estados Unidos, SUNY College of Forestry.
- Kopp, R.F., Maynard, C.A., Rocha De Niella, P., Smart, L.B. y Abrahamson, L.P. 2002. Collection and storage of pollen from *Salix* using organic solvents. *American Journal of Botany*, 89: 248-252.
- Kopp, R.F., Smart, L.B., Maynard, C.A., Isebrands, J.G., Tuskan, G.A. y Abrahamson, L.P. 2001. The development of improved willow clones for eastern North America. *Forestry Chronicle*, 77: 287-292.
- Landberg, T. y Greger, M. 2002. Interclonal variation of heavy metal interactions in *Salix viminalis*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21: 2669-2674.
- Phillips, I.S. 2002. *Quantitative genetics of traits predictive of biomass yield in first- and second-generation Salix eriocephala*. M.S. thesis. Syracuse, Nueva York, Estados Unidos, SUNY College of Environmental Science and Forestry.
- Pulford, I.D., Riddell-Black, D. y Stewart, C. 2002. Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: The potential for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 4: 59-72.
- Tharakan, P.J., Volk, T.A., Lindsey, C.A., Abrahamson, L.P. y White, E.H. 2005. Evaluating the impact of three incentive programs on cofiring willow biomass with coal in New York State. *Energy Policy*, 33: 337-347.
- Volk, T.A., Verwijst, T., Tharakan, P.J., Abrahamson, L.P. y White, E.H. 2004. Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 411-418.
- Vyslouzilova, M., Tlustos, P., Szakova, J. y Pavlikova, D. 2003. As, Cd, Pb and Zn uptake by *Salix* spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements. *Plant, Soil and Environment*, 49: 191-196.