

DENDROENERGÍA A PARTIR DE PLANTACIONES DE ROTACIÓN CORTA CON *Salix* spp.: RENDIMIENTOS Y CALIDAD DE BIOMASA OBTENIDOS EN LA PLATA, BUENOS AIRES.

Fabio Germán Achinelli^{1,2}, Guillermo Doffo², Silvia Monteoliva³, Virginia Luquez².

INTRODUCCIÓN

La matriz energética de la Argentina está conformada en un 87,3% por energía fósil, un 3,3% por energía nuclear y un 9,4 por energías renovables, de las cuales un 5% aproximadamente son fuentes bioenergéticas (Ministerio de Energía y Minería 2016). Se estima que la generación de electricidad con biomasa leñosa alcanza los 130 MW (aproximadamente 0,5% del Sistema Argentino de Interconexión), con ocho operadores principales: Celulosa Argentina, en Buenos Aires y Rosario, Santa Fe; Arauco Argentina, en Esperanza y Puerto Piray, Misiones; Papel Misionero, Misiones; UNITAN, Chaco; Don Guillermo, Misiones; e INTI, Chaco. La mayoría de estos operadores basan la generación en residuos de biomasa de *Pinus* spp. y / o *Eucalyptus* spp. La empresa Noble produce vapor para generar la electricidad utilizada en la trituration de la soja, empleando un 4,1% de biomasa de Salicáceas. En otros casos la biomasa leñosa es transformada sólo en vapor por combustión o co-combustión. En la Provincia de Buenos Aires uno de los principales consumidores de biomasa de Salicáceas para generar vapor es Papel Prensa SAICFyM, en San Pedro, utilizando como combustible la corteza de las trozas que es derivada desde un descortezador; se procesan 180 t/día, transformándolas en 450 t de vapor que posteriormente se utilizan en el proceso de producción de papel.

Los emprendimientos mencionados se han desarrollado, al menos en parte, con el fin de solucionar problemas específicos de abastecimiento y/o costo de la energía. Lo anterior se ha producido en un contexto en donde el país incrementó las importaciones de combustibles fósiles en la última década, debido a la caída de reservas nacionales. A partir de lo anterior, existe un creciente interés de los sectores público y privado por el uso de la biomasa leñosa para la generación de energía mediante procesos de combustión o co-combustión. Así, dentro de las medidas públicas adoptadas se destaca el programa gubernamental RenovAR (julio 2016), una iniciativa de inversión público y privado para generar energía a través de recursos renovables incluyendo dendroenergía; en las rondas 1 y 1.5 este programa lleva adjudicados 2423,5 MW en 59 proyectos, de los cuales dos están basados en biomasa forestal.

En muchos países, además del aprovechamiento de residuos forestales, es frecuente que se implanten bosques cuyo destino exclusivo es la producción de biomasa para energía, destacándose en los mismos las especies de rápido crecimiento (*Eucalyptus* spp., *Salix* spp., *Populus* spp. y *Robinia* spp.) (Lund et al., 2016). Los sauces en particular (*Salix* spp.) presentan en este sentido un elevado potencial (Klasnja et al., 2002), utilizándose mediante sistemas basados en el corte y rebrote de plantas madres, con elevadas densidades de plantación y corta rotación (máximo 4 años), denominados SRC (Short Rotation Coppice; Keoleian y Volk 2005).

¹ Profesional de Apoyo Principal CIC; fachinel@gmail.com

² Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), Bulevar 113 N° 495, tel. 0221 4236618.

³ Cátedra de Xilotecología, Facultad de Cs. Agrarias y Forestales UNLP.

En la Provincia de Buenos Aires los principales cultivos forestales son sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.), cuya madera se destina principalmente a la producción de papel, tableros de partículas y madera aserrada. Por el momento, no existen plantaciones comerciales de sauces con el objetivo primario de producir biomasa para energía. Una importante limitación para la formulación de este tipo de proyectos en Argentina es la escasez de información sobre la productividad de los SRC con sauces a nivel local. A su vez los rendimientos son afectados por la densidad de plantación, la longitud de la rotación y el genotipo (Willebrand et al. 1993). Otro factor importante es la disponibilidad hídrica, ya que los sauces son sensibles a la sequía (Wikberg y Ögren 2007). Sin embargo, algunos genotipos pueden aclimatarse a la sequía, reduciendo la apertura estomática y el área foliar, e incrementando la tolerancia a la cavitación (Wikberg y Ögren 2007). Esta variabilidad genética podría explotarse para obtener clones de sauce con mayor tolerancia al estrés hídrico. En muchas zonas de Argentina es común la existencia de períodos de sequía durante el verano (Hurtado et al. 2006), que podrían limitar la productividad de los sauces plantados en SRC.

Por otro lado, la información sobre la aptitud de la biomasa producida por los SRC para su transformación en energía por combustión es también muy limitada. Algunas de las principales características de la biomasa leñosa que impactan sobre su aptitud energética son: el contenido de humedad, la densidad de la madera, el poder calorífico y el contenido de cenizas (Tharakan et al., 2003; Cardoso et al., 2015). Para objetivos dendroenergéticos, se prefieren las materias primas con bajo contenido de humedad y cenizas, y con alta densidad de madera y poder calorífico (Lavrecque et al., 1997; Klasnja et al., 2002; Eloy et al., 2014). Los factores silvícolas, tales como la composición genética del rodal, la densidad, la duración de la rotación y el riego, pueden modificar estos parámetros de calidad (Lavrecque et al., 1997; Tharakan et al., 2003, 2005; Eloy et al., 2014).

En este trabajo se estudió un sistema SRC con sauces con los siguientes objetivos: a- determinar el efecto de la composición clonal, la densidad de plantación y el riego complementario sobre la producción de biomasa y b- estudiar la variación de la calidad de la biomasa según los factores silvícolas mencionados mediante determinaciones de densidad de la madera, contenido de humedad, poder calorífico, contenido de cenizas y energía acumulada por hectárea a través de la biomasa leñosa. La hipótesis es que los factores analizados (genotipo, densidad de plantación y disponibilidad hídrica) afectarán tanto la producción de biomasa como su calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo está basado en un experimento en campo que se implantó en la ciudad de La Plata (34°59'09" S; 57°59'42" O) entre el 28 de agosto y 1° de setiembre de 2012, en un suelo Argiudol típico (Hurtado et al. 2006). Previo a la plantación, se tomó una muestra compuesta de suelo (25 cm superiores del perfil) para determinar su fertilidad

(Tabla 1). La clase textural se determinó por el método de Bouyucus, indicando un suelo franco limoso (26,2 % de arcillas, 46 % de limo y 27,8 % de arena).

Se trata de un ensayo factorial completo con tres factores: riego, densidad y clon, con tratamientos dispuestos según un diseño en bloques y parcelas sub-subdivididas. Los tres bloques permitieron excluir la variabilidad causada por la pendiente presente en el sitio de ensayo. Cada bloque fue dividido en dos parcelas principales (con riego y sin riego, primer factor). Las parcelas fueron separadas entre sí por calles de cuatro metros de ancho, para evitar el movimiento lateral de agua hacia las parcelas de secano. Cada parcela se dividió en dos subparcelas con diferentes densidades de plantación (segundo factor), las densidades fueron 13.333 plantas.ha⁻¹ (configuración de 1 m por 0,75 m) y 20.000 plantas.ha⁻¹ (1 m por 0,5 m). Cada subparcela se dividió a su vez en dos sub-subparcelas con los clones *Salix matsudana* Koidz. x *Salix alba* L. 'Barrett 13-44 INTA' (Barrett), y *Salix alba* L. 'Yaguareté INTA - CIEF' (Yaguareté) (tercer factor); los clones se obtuvieron en programas de mejoramiento del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) (Cerrillo, 2014). Los bloques, parcelas, subparcelas y sub-subparcelas fueron separados por un borde del clon *Salix alba* x *Salix babylonica* L. 'Ragonese 131-25 INTA'. Los muestreos se llevaron a cabo sobre las dos filas y las 12 hileras centrales de cada sub-subparcela ($n = 24$ plantas).

Se instaló una cinta de riego por goteo en forma paralela a cada fila de plantación. Sobre las cintas se extendió un polietileno negro de 100 μ m de espesor como mulching para controlar las malezas. La plantación se realizó en forma manual con estacas de 70 cm de longitud. Las plantas muertas fueron repuestas por única vez en el segundo año. Se aplicaron cebos con Sulfluramida 0,3 % para el control de hormigas cortadoras (*Acromyrmex* spp.) y con Carbaryl 8 % para controlar el crustáceo isópodo *Armadillidium vulgare* Latreille.

Tabla 1. Parámetros de fertilidad química de la capa superficial del suelo (25 cm de profundidad) al comienzo del ensayo, setiembre de 2012.

Variable	Valor inicial
pH	6,63
Materia orgánica (% , Método de Walkey-Black)	2,8
Carbono total (% , método de Walkey-Black)	1,63
Nitrógeno total (% , método de macro Kjeldahl)	0,12
Relación C:N	13,2
Fósforo (Bray-I) (mg kg ⁻¹ , espectrofotometría)	20,9
Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹ , conductimetría)	0,18
Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg ⁻¹ , espectrofotometría de emisión)	17,4
Porcentaje de sodio intercambiable (% , espectrofotometría de emisión)	0,34
Sulfato extraíble 1:2.5 (mg kg ⁻¹ , turbidimetría)	20,7
Relación Ca/Mg (espectrofotometría de emisión)	4,71

Relación K/Mg (espectrofotometría de emisión)	0,52
Zinc (mg kg ⁻¹ , espectroscopia de absorción atómica)	3,97
Cobre (mg kg ⁻¹ , espectroscopia de absorción atómica)	6,12
Manganeso (mg kg ⁻¹ , espectroscopia de absorción atómica)	377
Hierro (mg kg ⁻¹ , espectroscopia de absorción atómica)	169

Las temperaturas y precipitaciones fueron registradas por una estación meteorológica automática (Davis Instruments) situada a 200 m del ensayo (figura 1). El equipo de riego funcionó durante los meses con balance hídrico potencialmente negativo de acuerdo a los datos históricos (noviembre a mayo, Hurtado 2006). El riego mantuvo el suelo a capacidad de campo, mientras que las parcelas de secano experimentaron los episodios de sequía que ocurrieron durante el periodo de crecimiento. La lámina de riego aportada fue de 543 mm en la temporada 2013 - 2014, y 843 mm durante 2014 - 2015.

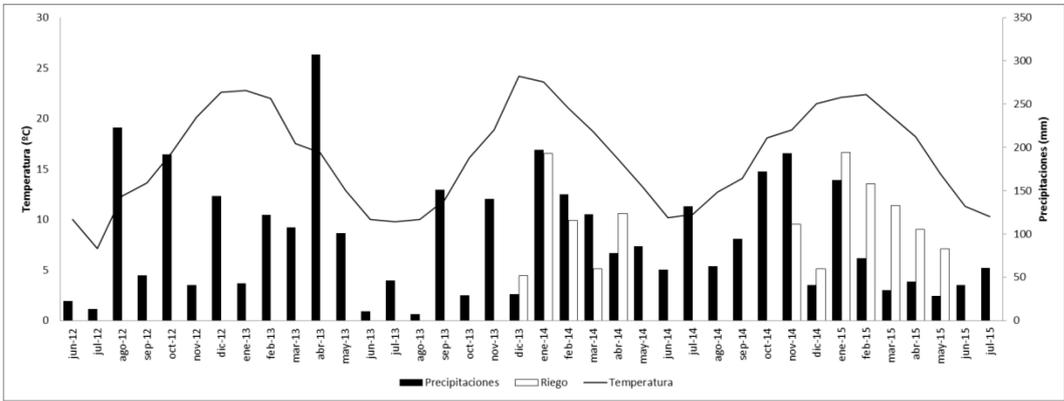


Figura 1. Temperatura media mensual, precipitaciones y lámina de riego suministrada durante el período del ensayo. Las precipitaciones y el riego son los valores acumulados mensuales.

Las determinaciones de rendimiento se efectuaron en las temporadas de crecimiento 2013-2014 y 2014-2015. La cosecha de material se llevó a cabo manualmente durante el período de reposo en invierno en dos etapas. Primero se extrajeron todas las guías de tres cepas madre de cada sub-subparcela, determinando su peso fresco, el peso seco a 105 °C y la relación peso seco / peso fresco. Luego se cosecharon todas las guías de las 21 plantas restantes de cada sub-subparcela y su peso fresco determinado con un dinamómetro. Este valor se transformó en peso seco utilizando la relación calculada previamente. El rendimiento se estimó extrapolando la biomasa seca de cada parcela a una hectárea.

Parte del material obtenido en la cosecha 2013-2014 fue procesado para analizar los parámetros de aptitud energética de la biomasa. Para ello se tomaron muestras de la porción basal de las guías provenientes de las tres cepas madres mencionadas más arriba. Estas muestras de 15 cm de longitud fueron descortezadas, para constituir probetas de xilema secundario. Sobre estas probetas se midieron propiedades físicas

(contenido de humedad, densidad básica). Para ello se saturaron durante una semana en agua. Se determinó el volumen saturado por desplazamiento de fluidos y se pesaron (peso saturado). Luego se llevaron a estufa hasta peso constante ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) y se determinó su peso anhidro. La densidad básica (DB, g/cm^3) se calculó como el cociente entre peso anhidro y volumen saturado; y el contenido de humedad inicial en base húmeda (CH, %) como la diferencia entre peso saturado y peso anhidro dividido el peso saturado.

Otra alícuota representativa de las tres cepas madres de la cosecha 2013 - 2014 fue secada al aire y chipeada con corteza en fragmentos de 2-3 cm con una astilladora comercial para maderas. De estos fragmentos, se tomó una muestra que fue molida a un tamaño de 1 mm con un molino Wiley (Thomas-Wiley Laboratory Mill, Modelo 4, Thomas Scientific EEUU). Las determinaciones de poder calorífico superior (datos no mostrados) y contenido de cenizas fueron llevadas a cabo por los laboratorios del INTA EEA Pergamino, utilizando un calorímetro a volumen constante para el poder calorífico superior de la biomasa (cal/g; CASTRO et al., 1999), y el método AOAC 942.05 para el contenido total porcentual de cenizas en base seca (%). El poder calorífico inferior (PCI; cal/g) se calculó para cada muestra a partir de su poder calorífico superior, de acuerdo con Owens y Cooley (2013); el contenido de hidrógeno (%) de las muestras no fue determinado en laboratorio, adoptándose un valor medio para madera de *Salix* publicado por Waliszewska et al. (2006). El rendimiento energético de los distintos tratamientos (Gj/ha) se estimó a partir de los rendimientos de biomasa para la temporada 2013-2014 y sus valores correspondientes de poder calorífico inferior, mediante la siguiente expresión:

$$\text{RE (Gj/ha)} = \text{Biomasa (Mg/ha)} \times \text{PCI (Mj/kg)}$$

RE= rendimiento energético, en Gigajoules por hectárea

B= Biomasa producida con corteza, expresada en Megagramos por hectárea de material anhidro (seco en estufa a 105°C).

PCI= poder calorífico inferior o neto, expresado en Megajoules por kilogramo de biomasa con corteza anhidra.

Los valores de las propiedades físicas de las probetas y de las muestras representativas se promediaron para obtener una base de datos de $n=24$.

Análisis estadístico: los análisis de varianza (ANDEVA) fueron realizados utilizando el programa INFOSTAT (InfoStat 2008). Se utilizó un modelo para bloques con parcelas divididas que incluyó el riego, la densidad y el clon como factores. Debido al diseño utilizado los factores presentan restricciones a la aleatorización. El análisis post-hoc se llevó a cabo utilizando la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos en biomasa de las parcelas regadas fueron significativamente superiores al tratamiento de secano en ambas temporadas de crecimiento,

independientemente de la densidad y el clon (tabla 2 y figura 2). En la temporada 2013-2014, los promedios de las parcelas regadas variaron entre 20,1 y 22,6 Mg.ha⁻¹.año⁻¹, mientras que las parcelas de secano rindieron entre 15,6 y 17,6 Mg.ha⁻¹.año⁻¹. En la temporada 2014-2015 la biomasa producida por las parcelas regadas varió entre 18 y 20,2 Mg.ha⁻¹.año⁻¹, mientras que el rango en secano fue de 11,2 a 13,4 Mg.ha⁻¹.año⁻¹. Estos resultados sugieren que la cantidad de agua recibida durante la temporada de crecimiento fue el factor principal en la determinación del rendimiento. En consecuencia, se llevó a cabo una regresión entre la biomasa seca producida y el aporte de agua, sumando las precipitaciones y el riego (figura 3). El aporte de agua explica el 92 % de la variabilidad de la biomasa seca en Barrett, y el 83 % en Yaguareté, confirmando que este factor fue el más determinante en las condiciones de este trabajo.

Tabla 2. ANDEVA de la biomasa seca (Mg.ha⁻¹.año⁻¹) producida en las dos temporadas de muestreo. Se indican los valores de *p* para los distintos factores del modelo. Los asteriscos indican: **p* < 0,05; ***p* < 0,01.

Factores	Biomasa 2013 - 2014	Biomasa 2014 - 2015
Riego	0,0029 **	0,0122*
Densidad	0,7731	0,7806
Clon	0,2676	0,0972

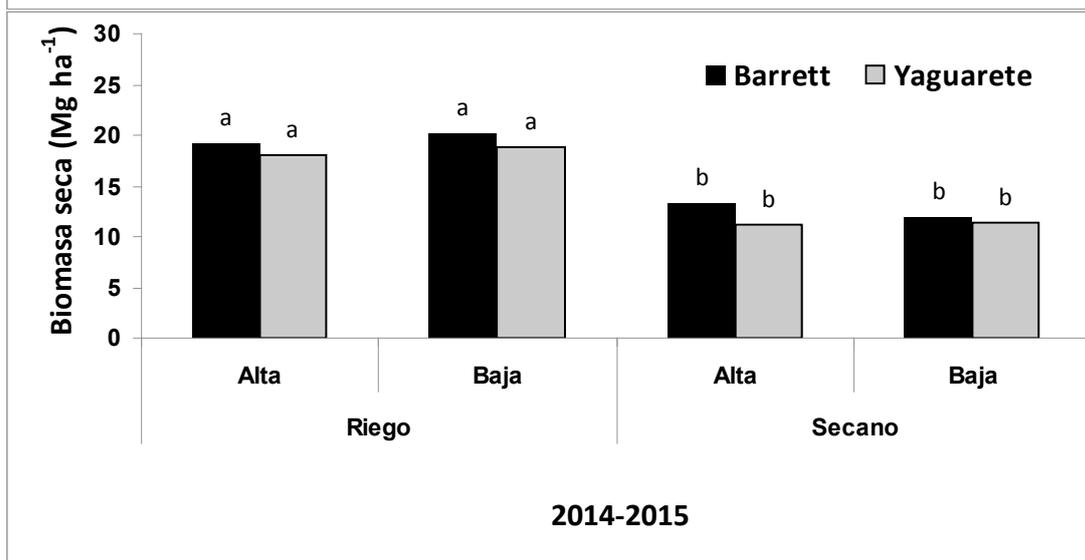
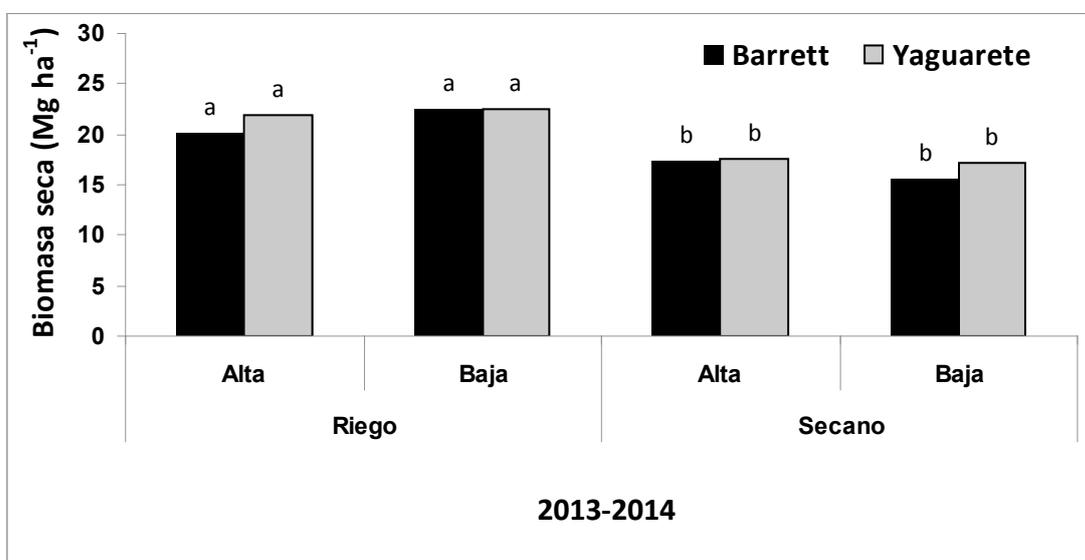


Figura 2. Biomasa seca ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en las temporadas 2013 - 2014 y 2014 - 2015, para $n = 24$. Las medias con la misma letra no difieren significativamente (prueba de Tukey $P < 0,05$) para el factor riego. Barras verticales: desvío estándar. Alta: densidad de plantación $20.000 \text{ plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$. Baja: densidad de plantación $13.333 \text{ plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$.

La ausencia de diferencias significativas entre las densidades en el rendimiento en biomasa seca del presente estudio es similar a lo reportado por Willebrand et al. (1993), quienes no encontraron diferencias en la producción de biomasa entre distintas densidades de plantación de sauce en SRC. Es probable que con rotaciones más largas, haya un aumento de la competencia entre cepas a la densidad más elevada que disminuya el crecimiento, pero con rotaciones de un año no se detectaron diferencias. Según estos resultados, sería conveniente plantar a menor densidad, ya que esto reduciría los costos de implantación que son elevados en este tipo de sistemas (Keoleian y Volk 2005, Baettig et al. 2010) y se evitaría la competencia en rotaciones más largas. En cambio, al analizar la productividad en función del riego las diferencias encontradas son significativas. Los tratamientos con riego rinden más que los tratamientos de secano, independientemente del clon y la densidad de plantación, y la disponibilidad de agua explica la mayor parte de la variabilidad en la biomasa observada a lo largo de los dos años para ambos clones. Estos resultados son

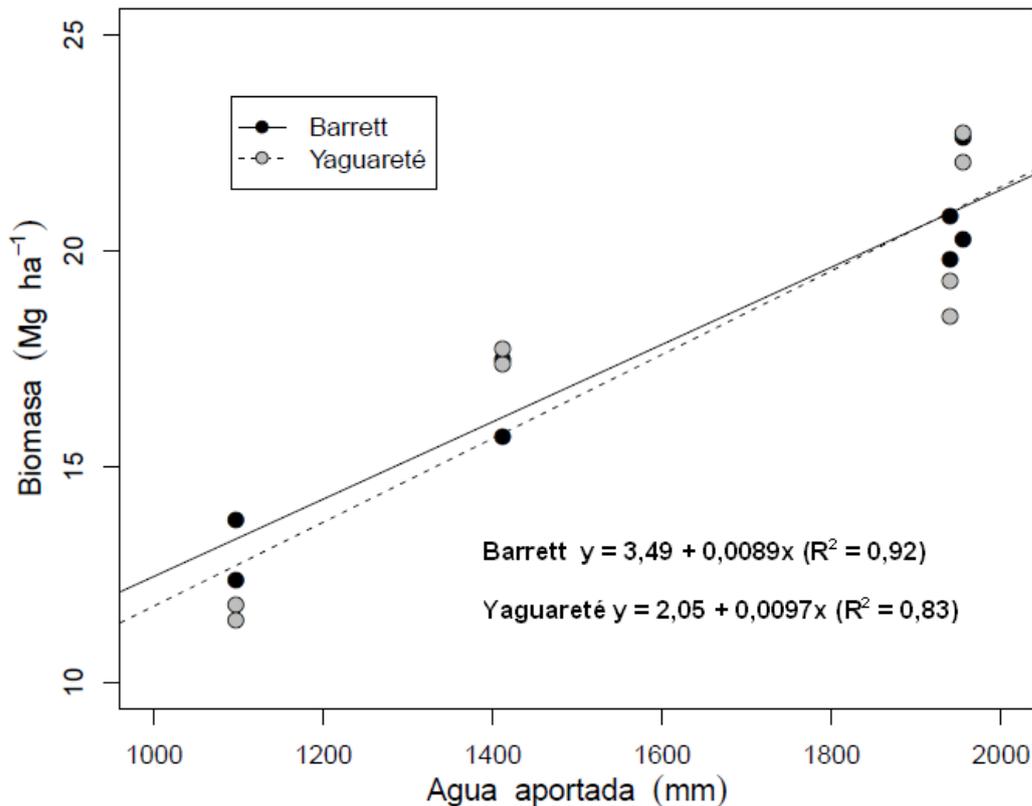


Figura 3. Relación entre la biomasa seca producida y el agua aportada al sistema (como precipitaciones y riego) para todos los años y tratamientos. El valor de R^2 es el ajustado ($n = 16$).

similares a los publicados para una red de parcelas experimentales de SRC en Italia, en los que se identificó a la disponibilidad de agua como el factor determinante en la acumulación de biomasa (Bergante et al. 2010). Los valores de productividad de las parcelas con riego complementario representarían un valor cercano al rendimiento potencial máximo alcanzable para un sistema de SRC con sauces en la zona, ya que el contenido de nutrientes del suelo es elevado y el mulching plástico ejerce un eficiente control sobre las malezas (Böhlenius y Övergaard 2015).

A pesar de que los clones analizados no fueron seleccionados como cultivo bioenergético, la productividad anual en los tratamientos se secano fue comparable a la reportada para otros sistemas SRC en condiciones similares. Para el Reino Unido, se han reportado valores máximos de 12-14 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ de materia seca al final de la rotación para cuatro genotipos de sauce (Cunniff et al. 2015). Karp et al. (2011) indican rendimientos promedio anuales de 14 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ de materia seca para genotipos de sauce mejorados para producir biomasa. Teniendo en cuenta que en nuestro ensayo cosechamos cada año, existe la posibilidad de que con rotaciones más largas se alcancen productividades mayores (Aylott et al. 2008, Quaye y Volk 2013). En el caso del tratamiento con riego, la productividad de este ensayo es menor a la reportada de 28 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ de materia seca para un sistema de SRC bajo riego con álamo en Mendoza, Argentina (Bustamante et al. 2011). Una diferencia importante es que el ensayo mencionado tuvo una rotación más larga (dos años) que explicaría los

mayores rendimientos observados. Si bien los resultados preliminares son prometedores, es necesario analizar la evolución de la productividad de estos genotipos a lo largo de las sucesivas rotaciones, que dependerá del mantenimiento de la capacidad de rebrote y de la supervivencia de las cepas (Karp et al. 2011). Esta información es relevante para determinar por cuánto tiempo serán productivas las plantaciones y estimar la rentabilidad comercial de los sistemas SRC.

La densidad de plantación como factor principal no influyó en ninguna de las variables vinculadas con la aptitud energética de la biomasa. El riego por otro lado afectó significativamente el rendimiento energético. Sin embargo, cuando se evalúa el riego en combinación con densidades diferentes se determinan interacciones, que fueron significativas para el contenido de humedad (tablas 3 y 4).

Tabla 3. Significancias de los valores p obtenidas a partir del ANDEVA llevado a cabo para las variables de aptitud energética de la biomasa según los factores del experimento.

Factores	Densidad Básica	Contenido Humedad	Cenizas Totales	Rendimiento Energético	Poder Calorífico
Riego	ns	ns	0,081 ^{ms}	0,001 ^{**}	ns
D. plantación¹	ns	ns	ns	ns	ns
Clon	0,047 [*]	0,034 [*]	0,056 ^{ms}	ns	ns
D. Plantación x riego	ns	0,038 [*]	ns	ns	ns
Clon x D. plantación	ns	ns	ns	ns	ns
Clon x riego	ns	ns	ns	ns	ns
Clon x D. plantación x riego	0,024 [*]	ns	ns	ns	ns

¹ D. plantación: densidad de plantación; valores p significativos: ^{**}al 1%; ^{*} al 5%; ^{ms} al 10% (marginalmente significativo); ns: no significativo.

Las respuestas generales concuerdan con algunos resultados de otros autores tanto para sauces como para otras especies comerciales implantadas en SRC. Eloy et al. (2014) encontraron que la densidad de plantación no afecta significativamente el poder calorífico ni la densidad básica de la madera en cuatro especies de los géneros

Eucalyptus y *Acacia*, a ninguna edad (1 a 3 años). Labrecque et al. (1997) determinaron que la densidad de plantación tampoco afectó el poder calorífico superior, contenido de cenizas e índice de combustión para tres especies de *Salix* en cultivos SRC.

La genética clonal fue un factor significativo de variación para la densidad básica de la madera y contenido de humedad, mientras que su efecto sobre el contenido de cenizas fue marginal. La interacción genotipo x riego y la interacción triple modificó la densidad de la madera (tabla 3).

Estos resultados coinciden con datos de algunos trabajos previos. Según la bibliografía diferentes genotipos de *Salix* presentan distintos valores medios de densidad, contenido de humedad, cenizas y poder calorífico (Labrecque et al., 1997; Klansja et al., 2002, Tharakan et al., 2003, Cardoso et al., 2015) que derivan de pequeñas diferencias en la estructura anatómica y composición química durante el desarrollo del xilema. Según la bibliografía la densidad de la madera no influye en forma directa sobre el poder calorífico (Gravalos et al., 2016). La cantidad de lignina y los extractivos (sobre todo en solventes orgánicos) son los principales componentes químicos que influyen positivamente en el poder calorífico (Zanuncio et al., 2014; Gravalos et al., 2016), mientras que la celulosa y las cenizas lo hacen negativamente.

Tabla 4. Valores medios (\pm desvío estándar) de las variables vinculadas con la aptitud dendroenergética de la biomasa según los distintos tratamientos evaluados.

Clon	Densidad Plantación	Riego	Densidad Básica (g/cm ³)	Contenido Humedad (%)	Cenizas Totales (%)	Rendimiento Energético (GJ/ha)	Poder Calorífico (cal/g)
Y	BD	CR	0,397	47	2,13	406,4	4300,
			$\pm 0,03$	± 2	$\pm 0,12$	$\pm 46,4$	2
	BD	SR	1	52	2,07	313,2	4337,
			$\pm 0,01$	± 3	$\pm 0,09$	$\pm 66,8$	9
	AD	CR	5	54	2,03	398,1	4340,
			$\pm 0,02$	± 4	$\pm 0,27$	$\pm 33,9$	5
AD	SR	4	49	2,35	318,8	4326,	
		$\pm 0,00$	± 4	$\pm 0,06$	$\pm 16,8$	5	
B	BD	CR	5	47	1,89	406,4	4318,
			$\pm 0,01$	± 3	$\pm 0,20$	$\pm 34,4$	5
	BD	SR	8	49	2,08	283,5	4345,
			$\pm 0,01$	± 3	$\pm 0,20$	$\pm 34,4$	5

			$\pm 0,02$	± 3	$\pm 0,39$	$\pm 9,3$	9
			1				$\pm 22,8$
			0,402				4293,
AD	CR		$\pm 0,01$	46	1,80	361,7	9
			3	± 2	$\pm 0,17$	$\pm 17,3$	$\pm 27,9$
							4410,
AD	SR		0,403	46	2,02	321,1	2
			$\pm 0,02$	± 2	$\pm 0,04$	$\pm 45,3$	$\pm 161,$
			3				9

Y: clon Yaguareté, B: clon Barrett; D. plantación: densidad de plantación; CR: con riego, SR: sin riego

Doffo et al. (2017) reportaron diferencias en la anatomía de los vasos xilemáticos de estos mismos dos clones en ensayos de estrés abiótico (sequía e inundación periódicas). Ambos genotipos presentan diferencias estructurales y fisiológicas, y se los considera clones con diferente sensibilidad al estrés hídrico (Cerrillo et al., 2013). El clon Yaguareté es más sensible a la sequía y reacciona con una extensa defoliación y disminución de su conductancia estomática y capacidad conductiva del xilema, mientras que el clon Barrett lo hace en menor proporción (sensible a la inundación) (Doffo et al., 2017). El clon Yaguareté presenta a nivel del xilema mayor diámetro de vasos y menor frecuencia que el clon Barrett. Estos autores demostraron, en coincidencia con nuestros hallazgos, que los dos clones se ven afectados en forma diferencial (interacción clon x tratamiento) por estos eventos de estrés abiótico en muy corto plazo (15-40 días).

Para el género *Salix*, la bibliografía indica que los valores de densidad y contenido de humedad y cenizas varían entre rangos cercanos a los reportados en este trabajo dependiendo de las/los especies/clones y de la edad del material analizado (Labrecque et al., 1997; Klansja et al., 2002; Tharakan et al., 2003, 2005; Cardoso et al., 2015). Estos autores publicaron valores de densidad de $0,340 - 0,480 \text{ g/cm}^3$, de 50 - 58% en contenido de humedad, de cenizas 0,89 - 2,6% para diferentes especies/clones de sauces con edades comprendidas entre 1 a 3 años.

CONCLUSIONES

La hipótesis planteada en este trabajo sólo se verificó parcialmente. La disponibilidad de agua es el principal factor que determina el rendimiento en biomasa seca del sistema SRC con sauces analizado, mientras que el genotipo y la densidad de plantación no tienen un efecto significativo sobre ésta. Desde el punto de vista dendroenergético, el comportamiento del clon Barrett fue levemente superior al del clon Yaguareté, produciendo una madera de mayor densidad y con menor contenido de humedad. La densidad de plantación no afectó las variables energéticas (rendimiento energético y poder calorífico), pero sí lo hizo el tratamiento de riego. En función de lo anterior, un sistema de producción implantado con el clon Barrett, en la

densidad más baja (13.000 plantas/ha) y cultivado bajo riego presenta ventajas dendroenergéticas respecto de las demás combinaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Achinelli, F. ; Doffo, G. ; Etchevers, P. ; Luquez, V. 2016. A *Salix* spp. short rotation coppice system in Buenos Aires, Argentina: effects of clonal composition, planting density and drip irrigation on biomass production. Resúmenes de la 25° Sesión de la Comisión Internacional del Álamo, Berlín, p. 107, 2016.
- Aylott MJ, E Casella, I Tubby, NR Street, G Taylor. 2008. Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short rotation coppice in the UK. *New Phytologist* 178: 358-370. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02396.x
- Baettig R, M Yáñez A, M Albornoz A. 2010. Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque* 32(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. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.058
- Berthod, N.; Brereton, N.J.B.; Pitre, F.E.; Labrecque, M. 2015. Five willow varieties cultivated across diverse field environments reveal stem density variation associated with high tension wood abundance. *Front Plant Sci*, vol.6, p. 948.
- Böhlenius H, R Övergaard. 2015. Exploration of optimal agricultural practices and seedling types for establishing poplar plantations. *Forests* 6: 2785-2798. DOI:10.3390/f6082785.
- 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. Consultado el 18 de octubre de 2016. Disponible en: <http://jornadasdesalicaceas2011.blogspot.com.ar/p/trabajos-tecnicos.html>.
- Cardoso, M.B.; Ladio, A.H.; Dutrus, S.M.; Lozada M . 2015. Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia. *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, p. 514-520.
- Castro, R.; Suarez, J.; Eimil, F.M. 1999. Evaluación del poder calorífico superior en biomasa. *Investigación agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, vol.8, n.1, p. 129-138.
- Cerrillo T, ME Rodríguez , FG Achinelli, GN Doffo, V Luquez . 2013. Do greenhouse experiments predict willows responses to long term flooding events in the field? *Bosque* 34(1): 71-79. DOI: 10.4067/S0717-92002013000100009.
- Cerrillo T. 2014. Selección de 6 nuevos clones de sauce (*Salix* spp.) para el Delta del Paraná. Jornadas de Salicáceas 2014, La Plata, Argentina. Consultado el 2 de mayo de 2017. Disponible en: <http://jornadasdesalicaceas2014.blogspot.com.ar/p/actas-de-las-jornadas-de-salicaceas-2014.html>.
- Cunniff J, SJ Purdy, TJP Barraclough, M Castle, AL Maddisson, LE Jones, IF Shield, AS Gregory, A Karp. 2015. High yielding biomass genotypes of willows (*Salix* spp.) show differences in below ground allocation. *Biomass & Bioenergy* 80: 114-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.020>

- Doffo G, S Monteoliva, ME Rodríguez, V Luquez. 2017. Physiological responses to alternative flooding and drought stress episodes in two willows (*Salix* spp.) clones. *Canadian Journal of Forest Research* 47(2): 174-182. DOI: [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2016-0202](https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0202)
- Eloy, E.; Caron, B.O.; Agostinho da Silva, D.; Schmidt, D.; Trevisan, R.; Behling, A.; Elli, E.F. 2014. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, vol.38, n.3, p. 551-555.
- Gravalos, I.; Xyradikis, P.; Katerus, D.; Gialamas, T.; Bartizialis, D.; Giannoulis, K. 2016. An Experimental Determination of Gross Calorific Value of Different Agroforestry Species and Bio-Based Industry Residues. *Natural Resources*, vol.7, p.57-68.
- Hurtado MA, JE Giménez, MG Cabral. 2006. Análisis ambiental del partido de La Plata. Aportes al ordenamiento territorial. Buenos Aires, Argentina. Consejo Federal de Inversiones. 134 p.
- I-InfoStat. 2008. Manual de usuario, Versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 334 p.
- Karp A, SJ Hanley, SO Trybrush, W Macalpine, M Pei, I Shield. 2011. Genetic improvement of willows for bioenergy and biofuels. *Journal of Integrative Plant Biology* 53(2): 151–165. DOI: [10.1111/j.1744-7909.2010.01015.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01015.x)
- Keoleian GA, TA Volk. 2005. Renewable energy from willows biomass crops: life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Science* 24: 385-406. DOI: [10.1080/07352680500316334](https://doi.org/10.1080/07352680500316334)
- Klasnja, B.; Kopitovic, S.; Orlovic, S. 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, pp. 427-432.
- Labrecque, M.; Teodorescu, T.I.; Daigle, S. 1997. Biomass productivity and wood energy of *Salix* species after two years growth in SRIC fertilized with wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy*, vol.12, n.6, p. 409-417.
- Lund, P., J. Byrne, G. Berndes and I. Vasalos. 2016. *Advances in Bioenergy*. Wiley, UK, 982 pp.
- Ministerio de Energía y Minería. 2016. Balances Energéticos 2014. Consultado 6 de mayo de 2016. Disponible en: <http://www.energia.gov.ar>.
- Njakou Djomo, S.A.C.; Zenone, T.; De Groote, T.; Bergante, S.; Facciotto, G.; Sixto, H.; Ciria, P.; Weger, J.; Ceulemans, R. 2015. Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.1, p. 845 – 854.
- Ogasa, M.; Miki, N.H.; Murakami, Y.; Yoshikawa, K. 2013. Recovery performance in xylem hydraulic conductivity is correlated with cavitation resistance for temperate deciduous tree species. *Tree Physiol*, vol.33, p. 335–344.
- Owens, E.; Cooley, S. Calorific value of Irish woodfuels. 2013. Cofor Connects Notes – Processing / Products 32 (1-8). Disponible en: http://www.woodenergy.ie/media/woodenergy/content/woodfuelsstovesandboilers/PP3_2.pdf
- Quaye AK, TA Volk. 2013. Biomass production and soil nutrients in organic and inorganic fertilized willow biomass production systems. *Biomass & Bioenergy* 57: 113-125. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.002)
- Raymond, C.A. 2002. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. *Ann. For. Sci.*, vol. 59, n.5-6, p. 525-531.
- Sette J.R., C.R.; Rosada de Oliveira, I; Tomazello Filho, M.; Minoru Yamaji, F.; Laclau, J.P. 2012. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e

características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore, vol.36, n.6, p.1183-1190.

-Tharakan, P. J.; Volk, T. A.; Nowak, C. A.; Abrahamson, L. 2005. Morphological traits of 30 willow clones and their relationship to biomass production. Can. J. For. Res., vol.35, p. 421–431.

-Volk TA, LP Abrahamson, CA Nowak, LB Smart, PJ Tharakan, EH White. 2006. The development of short rotation willow in the northeastern United States for bionergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. Biomass & Bioenergy 30: 715 – 727. DOI:10.1016/j.biombioe.2006.03.001.

-Waliszewska, B.; Zborowska, M.; Pradzynski, W.; Kominer, A. 2006. Chemical composition and gross calorific value of selected *Salix* hybrids. Wood Structure and Properties, Arbora Publishers, Slovakia, p. 171-173.

-Wikberg, J.; Ögren, E. 2004. Interrelationships between water use and growth traits in biomass-producing willows. Trees, vol.18, p. 70–76.

-Wikberg J, E Ögren. 2007. Variation in drought resistance, drought acclimation and water conservation in four willow cultivars used for biomass production. Tree Physiology 27:1339-1346.

-Willebrand E, S Ledin, T Verwijst. 1993. Willow coppice systems in short rotation forestry: effects of plant spacing, rotation length and clonal composition on biomass production. Biomass & Bioenergy 4: 323-331.

-Zanuncio, A.J.V.; Carvalho, A.G.; Trugilho, P.F.; Campos, T.; Monteiro, T. 2014. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. Revista Árvore, vol.38, n.2, p. 369-374.