

Trabajos Técnicos

Ajuste preliminar de modelos de rendimiento para rodales del sauce 'Soveny Americano' (*Salix babylonica* var. *sacramenta*) en el Delta del Paraná, Argentina. **ACHINELLI, F.^{1,2}; APARICIO, A.³ y CELLINI, J.¹**

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP; ² CIC, Provincia de Buenos Aires; fachinel@agro.unlp.edu.ar; ³ INTA EEA Bariloche, Provincia de Río Negro.

Las plantaciones de Salicáceas del Delta del Paraná están compuestas mayoritariamente por sauces (*Salix* spp.). Si bien su composición clonal está cambiando en forma paulatina, el sauce 'Soveny Americano' (*Salix babylonica* var. *sacramenta*) es todavía uno de los clones con mayor superficie cultivada. El objetivo de este trabajo es obtener en forma preliminar modelos empíricos para estimar el rendimiento del sauce Soveny Americano que sean de utilidad para productores y técnicos de la región. Se trabajó sobre datos provenientes de 173 parcelas temporarias (PT) de muestreo, abarcando sitios con diferente sistematización del agua, plantaciones y rebrotes, en un rango de edades (E) entre 5 y 35 años. Los datos estructurales de las PT fueron procesados para obtener estimaciones de altura media dominante (AMD; m) área basal (AB; m².ha⁻¹), índice de densidad de rodal de Reineke (IDR) y rendimiento expresado en peso del total de la madera con corteza por hectárea (PTcc; t.ha⁻¹) y en peso útil (PUcc; t.ha⁻¹) definido por una punta fina ≥ 7,5 cm. Se ajustaron curvas anamórficas de AMD – E mediante el método de la curva guía, para estimar el índice de sitio (IS) de cada parcela con una edad base de 15 años. Finalmente se ajustaron modelos lineales múltiples para predecir el PTcc o el PUcc, evaluando el desempeño de los mismos según la utilización de una, dos o tres variables independientes (E, IS, AB, IDR). Se seleccionó el modelo (1) desde el punto de vista de su bondad de ajuste, aplicabilidad y sencillez:

$$PUcc = -186,237 + 5,87301.E + 5,7224.AB + 5,0385.IS \quad (1)$$

Para este modelo se obtuvo un $R^2_{aj} = 96,03\%$, y un error absoluto medio EAM= 12,07 t.ha⁻¹. De las variables independientes analizadas, la de mayor contribución a la predicción del PUcc es el AB, seguida de la E y por último del IS. Dado que E es un dato generalmente conocido que no tiene costo de muestreo, y que el IS es la variable de menor contribución a la variación observada, se podría simplificar aún más el modelo de rendimiento:

$$PUcc = -108,789 + 5,07766.E + 6,5454.AB \quad (2)$$

Para este modelo se obtuvo un $R^2_{aj} = 93,7\%$ y un EAM= 15,2 t.ha⁻¹.

Palabras clave: *Salix babylonica* var. *sacramenta* 'Soveny Americano', modelos, rendimiento, Delta del Paraná.

Introducción.

El ‘Soveny americano’ (“Sauce americano”; *Salix babylonica* var. *sacramenta*) es uno de los clones sauce con mayor superficie cultivada en el Delta del Paraná (Borodowski y Suárez, 2004; Signorelli y Gaute, 2012). Se trata de un material que tiene más de 60 años de cultivo, y su madera es un insumo clave para la producción de papel de diario (Cerrillo, 2010). Debido a su buena capacidad de rebrote y alta tolerancia a períodos prolongados de anegamiento, en las últimas décadas una proporción mayoritaria de la superficie plantada con Soveny americano ha pasado a manejarse como “monte bajo”. A pesar de que este clon está siendo reemplazado gradualmente por nuevos clones híbridos (Cerrillo, 2015), su importancia sigue vigente, y aún se hace necesario contar con información para su manejo. En este contexto se publicaron ecuaciones para predecir el volumen (Fernández Tschieder et al., 2014) y manejar la densidad mediante un diagrama de manejo basado en el índice de densidad de rodal de Reineke (Russo, 2013). Más allá de esos avances, se carece de modelos que permitan estimar el rendimiento de las plantaciones de Soveny americano, información que es necesaria para productores que necesitan planificar las cortas y la compra-venta de madera. Los modelos empíricos y de rodal son de particular utilidad en estos casos (Weiskittel et al., 2011), pues sus estimaciones están basadas en parámetros de las plantaciones que son conocidos para los productores (como la edad), y/o que son relativamente sencillos de registrar, como la densidad y la calidad de sitio.

El objetivo de este trabajo es obtener en forma preliminar modelos empíricos para estimar el rendimiento del sauce Soveny americano, que sean de utilidad para productores y técnicos de la región.

Materiales y Métodos.

Se trabajó sobre datos provenientes de 173 parcelas temporarias de muestreo (PT), abarcando plantaciones y rebrotes, en sitios con diferente sistematización del agua, en un rango de edades (E) de entre 5 y 35 años. Los datos estructurales de las PT fueron procesados para obtener estimaciones de altura media dominante (AMD; m) área basal (AB; m².ha⁻¹), índice de densidad de rodal de Reineke (IDR; Russo, 2013) y rendimiento expresado en peso del total de la madera con corteza por hectárea (PTcc; t.ha⁻¹) y en peso útil (PUcc; t.ha⁻¹) definido por una punta fina ≥ 7,5 cm.

La información sobre la AMD y la edad de las PM fue procesada mediante el método de la “curva guía” (Amico et al., 2010; Clutter et al., 1983) para ajustar la ecuación 1 a los datos; la edad índice fue definida en 15 años. El ajuste de la ecuación 1 se realizó por regresión simple sobre los datos de AMD previamente transformados (ln AMD), es decir ajustando una recta a los datos de ln AMD en función de la inversa de la edad, para luego regresar a la ecuación exponencial original (Clutter, et al., 1983).

$$AMD = K_0 \cdot e^{B \left(\frac{1}{E} \right)}$$

Ecuación 1

donde AMD es la altura media dominante (m); K₀ es una constante con distintos valores según el IS; e es la constante de Napier; B es la constante de la “curva guía” y E es la edad en años.

Se trazaron curvas anamórficas con una equidistancia a la edad índice de 4 m, buscando cubrir gráficamente la dispersión de la altura dominante originada por el muestreo

de rodales de diferentes calidades de sitio (Glade, 1999). Luego se obtuvo el valor de la constante K_0 y el índice de sitio (IS; m) para cada PM (cada par ordenado de AMD y edad).

Una vez completada la base de datos con el IS, se evaluaron ajustes de distintos modelos lineales en donde las variables dependientes fueron el PTcc o el PUcc, y las variables predictoras fueron la edad (E), el índice de sitio (IS), la densidad del rodal (IDR o AB) en forma individual o combinadas.

Para la selección de los modelos se priorizó su sencillez, junto con una evaluación de la bondad de ajuste en donde se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), el error absoluto medio (EAM) y la distribución de errores. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el programa Infostat (InfoStat, 2008).

Resultados y Discusión.

Mediante la ecuación 1 ajustada a los datos de AMD y E de cada parcela de muestreo, se obtuvieron índices de sitio que variaron entre 10,4 m y 24,9 m; los pesos totales de madera con corteza estuvieron comprendidos entre 6,6 y 580,2 t.ha⁻¹ (tabla 1).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la base de datos de *Salix babylonica* var. *sacramenta* ‘Soveny americano’ ($n= 173$) utilizada para el ajuste de los modelos de índice de sitio (IS) y de rendimiento.

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Desvío estándar
<i>Edad (años)</i>	5	35	14,4	4,6
<i>Índice de Sitio (IS, m)</i>	10,4	24,9	17,5	2,8
<i>Área Basal (AB, m².ha⁻¹)</i>	5,8	63,8	26,9	9,8
<i>Índice de densidad de Rodal (IDR)</i>	129,2	1293,0	561,9	199,4
<i>Peso total (PTcc, t.ha⁻¹)</i>	6,6	580,2	173,9	94,0
<i>Peso útil (Pucc, t.ha⁻¹)*</i>	4,4	517,8	140,2	83,0

* expresado en toneladas de madera verde, con punta fina $\geq 7,5$ cm y con corteza

El ajuste por regresión simple de la recta \ln AMD – edad⁻¹ fue significativo, aunque el coeficiente de determinación ajustado obtenido resultó bajo ($R^2_{aj}= 37,2\%$), posiblemente debido al faltante de datos para las clases de mayor edad y a la elevada diversidad de calidades de sitio muestreada (gráfico 1). Las curvas anamórficas de índice de sitio obtenidas permitieron un análisis inicial de la calidad de sitio, para su inclusión en el ajuste del modelo de rendimiento.

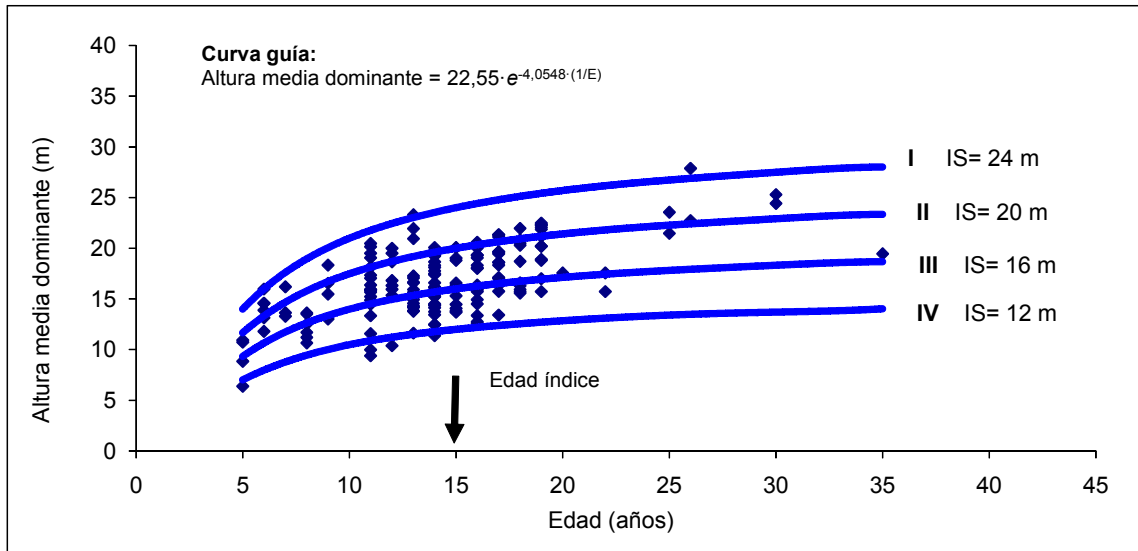


Gráfico 1. Trazado de curvas anamórficas de índice de sitio (12 m - 24 m) con una equidistancia de 4 m, para la edad índice (15 años), utilizando la altura media dominante y la edad de $n= 173$ parcelas de muestreo de *Salix babylonica* var. *sacramenta* `Soveny Americano´ en el Delta del Paraná.

Los resultados alcanzados mediante el ajuste de distintos modelos lineales para la predicción del rendimiento fueron diferentes, y se resumen en la tabla 2 a continuación.

Tabla 2. Valores de coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) y error absoluto medio ($t \cdot ha^{-1}$) obtenidos en el ajuste de modelos lineales para la predicción rendimiento del sauce Soveny americano, expresado en peso total ($t \cdot ha^{-1}$) y el peso útil ($t \cdot ha^{-1}$; punta fina $\geq 7,5$ cm) según la combinación de variables independientes incluidas en los mismos.

Variable dependiente	Variables independientes	R^2_{aj}	Error absoluto medio (EAM, t.ha ⁻¹)
Peso total (<i>PTcc</i> , t.ha ⁻¹)	<i>E</i>	52,0	48,3
	<i>IS</i>	22,1	57,5
	<i>AB</i>	91,1	21,2
	<i>E; IS</i>	69,7	37,6
	<i>E; IS; IDR</i>	96,4	12,9
	<i>E; IS; AB</i>	96,9	11,9
	<i>E; AB</i>	95,1	15,5
Peso útil (<i>Pucc</i> , t.ha ⁻¹)*	<i>E</i>	54,0	41,5
	<i>IS</i>	22,6	49,6
	<i>AB</i>	88,5	21,2
	<i>E; IS</i>	72,0	31,5
	<i>E; IS; IDR</i>	95,4	12,9
	<i>E; IS; AB</i>	96,0	12,0
	<i>E; AB</i>	93,7	15,2

* expresado en toneladas de madera verde, con punta fina $\geq 7,5$ cm y con corteza; *E* = edad en años
IS = índice de sitio en m; *AB* = área basal en m²-ha⁻¹

En general los resultados mostraron que el área basal tiene una mayor importancia que la edad y el *IS* respecto de la variabilidad explicada por los modelos lineales (tabla 2). Teniendo en cuenta el peso útil, el modelo que tuvo un mayor R^2_{aj} y un menor error absoluto medio (EAM; t.ha⁻¹) fue:

$$PUcc = -186,237 + 5,87301 \cdot E + 5,7224 \cdot AB + 5,0385 \cdot IS \quad (1)$$

Para este modelo (1) se obtuvo un R^2_{aj} de 96,03% y un error absoluto medio (EAM) de 12,07 t/ha. Dado que *E* es un dato generalmente conocido que no tiene costo de muestreo, y que el *IS* es la variable de menor contribución a la variación observada, se podría simplificar aún más el modelo de rendimiento:

$$PUcc = -108,789 + 5,07766 \cdot E + 6,5454 \cdot AB \quad (2)$$

En el caso de este modelo (2) se obtuvo un R^2_{aj} de 93,7%, y un EAM de 15,2 t.ha⁻¹.

También podría darse el caso de un productor que sólo contara con información sobre la edad de sus plantaciones, y que quisiera estimar el crecimiento de un rodal de Soveny americano bajo tres posibles escenarios de calidad de sitio (baja, media y alta). Para simular esta situación, el productor debería utilizar el siguiente modelo (3), para el cual se obtuvo un R^2_{aj} de 72,0%, y un EAM de 31,5 t.ha⁻¹ :

$$PUcc = -260,54 + 12,7376 \cdot E + 12,4344 \cdot IS \quad (3)$$

Así por ejemplo, si se aplica el modelo 3 a rodales con IS= 12 (calidad de sitio baja), IS= 18 (calidad de sitio media) e IS= 24 (calidad de sitio alta) y para una rotación de 15 años se podrían esperar los rendimientos que se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Estimaciones del rendimiento en peso útil (t.ha⁻¹; punta fina ≥ 7,5 cm) para un turno de 15 años y calidades de sitio baja, media y alta en el Delta del Paraná, realizadas utilizando un modelo de predicción a partir de la Edad y el índice de sitio IS.

Edad	Rendimiento* (t.ha ⁻¹)		
	IS= 12 m	IS= 18 m	IS= 24 m
3	0,0	1,5	76,1
4	0,0	14,2	88,8
5	0,0	27,0	101,6
6	0,0	39,7	114,3
7	0,0	52,4	127,0
8	0,0	65,2	139,8
9	3,3	77,9	152,5
10	16,0	90,7	165,3
11	28,8	103,4	178,0
12	41,5	116,1	190,7
13	54,3	128,9	203,5
14	67,0	141,6	216,2
15	79,7	154,3	228,9

* expresado en toneladas de madera verde, con punta fina ≥ 7,5 cm y con corteza

Consideraciones finales.

Se ajustaron modelos lineales, empíricos y de rodal para estimar el rendimiento de plantaciones del sauce Soveny americano en el Delta del Paraná, utilizando la edad e indicadores de calidad de sitio y densidad. Del total de modelos evaluados, se destacan tres por su bondad de ajuste y sencillez, y que para ser utilizados requieren del conocimiento de la edad de la plantación o del rebrote, y eventualmente del índice de sitio y el área basal. La elección de la curva de índice de sitio en cada situación puede realizarse determinando en campo la altura media dominante y la edad de la plantación, para luego utilizar la curva guía que se desarrolló para este trabajo.

Agradecimientos.

A Papel Prensa S.A.I.C.F. y M. por la colaboración prestada.

Bibliografía citada.

- Amico, I., J. Bava y A. Calderón (2010). Índices de calidad de sitio de *Populus nigra* 'Italica' en plantaciones lineales en el noroeste de Chubut . Rev. FCA UNCuyo, 42 (1): 147-158.
- Borodowski, E. D., y R. O. Suárez (2004). El cultivo de álamos y sauces: su historia en el Delta del Paraná. SAGPyA Forestal 32: 5-13.
- Cerrillo, T. (2010). El mejoramiento genético. Actas de la Jornada Técnica sobre el Sauce, INTA EEA Delta, 22 de Julio de 2010, pp. 103-109.
- Cerrillo, T. (2015). Mejoramiento genético de sauces. Jornada de Transferencia, Unidad para el Cambio Rural (UCAR) - Dirección de Producción Forestal - Programa Nacional Forestales del INTA. EEA Delta del Paraná, 18 de agosto de 2015. [En línea] : [Fecha de consulta: 11-9-2017] Disponible en: http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/proyectos_forestales/transferencia/tigre/PROME%20CERILLO.pdf
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L., Brister, G.H. y Bailey, R. L. (1983). Timber Management: A Quantitative Approach. J. Wiley and Sons ed., 333 pp.
- Fernández Tschieder, E.; Achinelli, F.; Russo, F.; y Angelinetti, S. (2014). Ecuaciones de volumen total y comercial para rebrotes de *Salix babylonica* var. *sacramenta* 'Soveny americano'. Actas de las Jornadas de Salicáceas 2014, Ciudad de La Plata, del 18 al 21 de marzo de 2014, 8 pp.
- Glade, J. E. (1999). Curvas de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos. PROFOSEC, y Proyecto Forestal de Desarrollo SAGPyA-BIRF, NEF Entre Ríos-Corrientes Sur, 11 pp.
- InfoStat 2008. Manual de usuario, Versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 334 pp.
- Russo, F. (2013). Desarrollo de un diagrama de manejo de la densidad para talleres de *Salix babylonica* var. *sacramenta* 'Soveny americano' en el Delta del Paraná. Trabajo final de Carrera, Ingeniería Forestal, Fac. de Cs. Agrarias y Ftales. UNLP, 43 pp.
- Signorelli, A., Gaute, M., 2012. Mapa de Plantaciones Forestales. Área de Sistemas de Información Geográfica e Inventario Forestal de la Dirección de Producción Forestal del MAGyP.
- Weiskittel, A., D. Hann, J. Kershaw and J. Vanclay (2011). Forest growth and yield modeling. Wiley-Blackwell, UK, 415 pp.
-