

Ajuste de modelos de volumen de fuste para *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ y ‘Guardi’ en plantaciones irrigadas de Mendoza, Argentina

Stem volume model adjustment fitting for *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ and ‘Guardi’ in irrigated plantations in Mendoza, Argentina

Ignacio A Mundo ^{a,b*}, Elisa A Rovida-Kojima ^c, Valeria Aschero ^{a,b}

*Autor de correspondencia: ^a Laboratorio de Dendrocronología e Historia Ambiental, IANIGLA-CONICET, CCT CONICET Mendoza, Mendoza, Argentina, tel.: +54 261 5244273, iamundo@mendoza-conicet.gob.ar

^b Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Mendoza, Argentina.

^c IADIZA-CONICET, CCT CONICET Mendoza, Mendoza, Argentina.

SUMMARY

Despite the extensive literature on model fitting to estimate volume in different tree species and regions of Argentina, the references related to volume equations for *Populus* spp. in irrigated plantations in the Province of Mendoza are scarce. This information is essential for silvicultural management. The objectives of this study were: 1) to calculate and compare the artificial form factors for *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ and ‘Guardi’ clones growing in irrigated plantations in Uco Valley, Mendoza, 2) to fit and compare different equations of stem volume with bark for these two clones and 3) to evaluate the possibility of using a single function to estimate this parameter in both clones. Seven models previously used on *Populus* in Argentina were fitted to estimate the total stem volume per tree. The form factors for ‘Conti 12’ and ‘Guardi’ were different between them (0.44 and 0.38, respectively). For both, ‘Conti 12’ and ‘Guardi’, the adjustment of the seven models allowed estimating the total stem volume with bark with a very high and similar degree of precision, although in both situations two models (Schumacher-Hall and a variant of the standard function with constant form factor) highlighted over the rest. The statistics of self-validation, homoscedasticity and parsimony criteria allow favoring the decision for the Schumacher-Hall model adjusted individually for each clone and not as a general expression.

Key words: volume table, form factor, models, poplar, Cuyo Region.

RESUMEN

A pesar de la amplia literatura existente sobre el ajuste de modelos para estimar el volumen en especies forestales y regiones de Argentina, los antecedentes de ajuste de ecuaciones de volumen para *Populus* spp. de plantaciones bajo riego de la provincia de Mendoza son escasos. Esta información es necesaria para la planificación y la gestión silvícola. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) calcular y comparar los factores artificiales de forma para los clones *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ y ‘Guardi’ creciendo en plantaciones bajo riego del valle de Uco, Provincia de Mendoza, 2) ajustar y comparar diferentes ecuaciones de volumen de fuste con corteza para estos dos clones y 3) evaluar la posibilidad de utilizar una única función para estimar este parámetro en ambos clones. Siete modelos empleados previamente en plantaciones de *Populus* spp. en Argentina fueron ajustadas para estimar el volumen total de fuste por árbol. Los factores de forma para ‘Conti 12’ y ‘Guardi’ resultaron diferentes entre sí (0,44 y 0,38, respectivamente). Tanto para ‘Conti 12’ como para ‘Guardi’ el ajuste de los siete modelos permitió estimar el volumen total del fuste con corteza con un grado de precisión muy alto y similar, aunque en ambas situaciones se destacaron los modelos de Schumacher-Hall y una variante de la función estándar con factor de forma constante sobre el resto. Los indicadores de autovalidación, homogeneidad de varianza y criterio de parsimonia permiten inclinar la decisión por el de Schumacher Hall ajustado en forma individual para cada clon.

Palabras clave: tabla de volumen, ecuaciones, factor de forma, álamo, Cuyo.

INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones de volumen o antiguamente llamadas tablas de volumen (volúmenes promedio tabulados de árboles de diámetros y alturas dadas) son fundamentales para el manejo de cualquier predio forestal cuyo propósito principal es la producción de madera (Schumacher y Hall

1933). Los modelos biométricos para estimar el volumen pueden ser ecuaciones locales (donde el volumen está en función de una sola variable, como el diámetro) o estándares (donde el volumen está en función de dos o más variables, usualmente el diámetro y la altura total) (Clutter *et al.* 1983, Prodan *et al.* 1997). Una vez determinado el volumen del árbol medio y, luego multiplicándolo por el número de

individuos en la población, se puede estimar el volumen del rodal. La dificultad práctica en la aplicación de este procedimiento consiste en determinar cuál podría ser el volumen del árbol medio, y también en conocer el número total de árboles en el rodal (Kershaw Jr. *et al.* 2016).

En la recopilación de ecuaciones de volumen individual de especies forestales nativas e introducidas en Argentina realizada por Maggio y Cellini (2016) se compilaron 15 experiencias de ajustes de modelos o ecuaciones de volumen para el género *Populus*. Estos procedimientos de ajuste de ecuaciones de volumen han estado concentrados en plantaciones de *Populus deltoides* Bartr. ex Marsh. de la provincia de Buenos Aires (Denegri y Marlats 1991, Suárez y García Volonté 1993, Marquina *et al.* 1997, Fernández Tschieder *et al.* 2011), en plantaciones bajo riego de *P. deltoides* y *P. x canadensis* Moench en Santiago del Estero (Pece *et al.* 2002) y en cortinas de *P. nigra* L. en Chubut y Santa Cruz (Peri 1994, Peri y Martínez Pastur 1998, Amico *et al.* 2009). Sin embargo, no se reportó ninguna experiencia para plantaciones irrigadas en la región de Cuyo (Provincia de Mendoza, Argentina).

En el caso particular de plantaciones forestales en mazo de la provincia de Mendoza, los clones *Populus x canadensis* 'I-214', 'Conti 12' y 'Guardi' son los más difundidos a nivel comercial (Calderón 2006), siendo estos dos últimos los que mayormente se encuentran plantados en la actualidad. La empresa Cuyoplacas utiliza indistintamente en sus fincas con plantaciones forestales de 'Conti 12' y 'Guardi' un coeficiente de forma de 0,54 calculado a partir de individuos 4 años de edad para estimar el volumen individual¹. Sin embargo, se desconoce el error de estimación por la utilización de un único factor de forma para ambos clones y el error en la utilización de este factor de forma al momento del turno (entre los 10 y 12 años de edad). Por otra parte, se reportaron volúmenes para plantaciones de este género en Mendoza (Riu *et al.* 2008a, 2008b, Calderón *et al.* 2009, Calderón 2010) pero no se presentaron los

modelos o ecuaciones de volumen utilizados ni tampoco el procedimiento estadístico asociado al ajuste de los mismos. Recientemente, el inventario de plantaciones forestales para la región de Cuyo presentó una ecuación estándar para la estimación del volumen de árboles de *Populus*, sin discriminar la especie o clon y con la inclusión de un coeficiente mórfo de 0,45 (Benítez *et al.* 2017). Sin embargo, no se remite a ninguna referencia ni proceso de ajuste estadístico.

Dado que los clones 'Conti 12' y 'Guardi' surgieron del mismo tipo de hibridación (*Populus x canadensis*), se plantea como hipótesis que los dos clones tienen el mismo factor de forma artificial y que sus volúmenes pueden estimarse mediante una única función. En consecuencia, los objetivos de este trabajo fueron: 1) calcular y comparar los factores artificiales de forma para los clones *Populus x canadensis* 'Conti 12' y 'Guardi' creciendo en plantaciones bajo riego del valle de Uco, Provincia de Mendoza, 2) ajustar y comparar diferentes ecuaciones de volumen de fuste con corteza para estos dos clones y 3) evaluar la posibilidad de utilizar una única ecuación de volumen para ambos clones.

MÉTODOS

Se emplearon 77 árboles apeados específicamente para este estudio al momento de la corta final de seis plantaciones bajo riego de *P. x canadensis* del Valle de Uco, Pcia. de Mendoza. En cada árbol se realizó la medición del diámetro a 1,30 m de altura (DAP), la altura total (HT) y se estimó el volumen total del fuste con corteza (VTcc) sin considerar el volumen del tocón (cuadro 1). La altura total se midió en los árboles en pie y luego se verificó mediante la suma del largo del fuste y la altura del tocón de cada individuo.

El volumen con corteza se obtuvo como la sumatoria del volumen contenido en cada sección del fuste incluido el ápice. El largo de estas secciones quedó definido por largo de las trozas comercializadas en la región (2,2 m). En cada individuo se midieron dos diámetros cruzados con

Cuadro 1. Estadística descriptiva de la base de datos de *Populus x canadensis* 'Conti 12' y 'Guardi' utilizada en este estudio. La información provista en el Cuadro se refiere a valores máximo y mínimos por variable y entre paréntesis se presenta el valor medio \pm su error estándar.

Descriptive statistics of the data set of *Populus x canadensis* 'Conti 12' and 'Guardi' trees used in this study.

	'Conti 12'	'Guardi'
n	56	21
Edad	7 - 12 (9,4 \pm 0,3)	10 - 11 (10,5 \pm 0,1)
DAP (cm)	6,1 - 28,4 (21,1 \pm 0,7)	15,7 - 27,1 (21,8 \pm 0,6)
HT (m)	7,0 - 31,5 (22,0 \pm 0,6)	12,7 - 24,2 (17,1 \pm 0,6)
VTcc (m ³)	0,012 - 0,727 (0,386 \pm 0,026)	0,101 - 0,502 (0,254 \pm 0,024)

n = tamaño de la muestra; Edad = cantidad de años transcurridos desde la fecha de plantación; DAP = diámetro a 1,3 m de altura; HT = altura total; VTcc = volumen total de fuste con corteza.

¹ Luis Leiva, Cuyoplacas SA, comunicación personal.

corteza a diferentes alturas desde suelo hasta alcanzar un diámetro con corteza de 5 cm y se registró la distancia desde este punto hasta el ápice del árbol. El volumen de cada sección se calculó con la fórmula de Smalian hasta los 5 cm de diámetro con corteza y se aplicó la fórmula del cono para el ápice (Prodan *et al.* 1997).

El factor de forma artificial promedio (Cailliez 1980) por clon se estimó a partir de la correspondiente muestra de árboles según la siguiente ecuación:

$$F = \frac{\sum v}{\sum g \times h} \quad [1]$$

donde *F*: factor de forma artificial promedio, *v*: volumen total del fuste, *g*: área basal del árbol a 0,3 m y *h*: altura total del árbol.

Luego, se realizó una prueba *t* de Student para poner a prueba la hipótesis de igualdad de medias de los factores de forma (método de Cochran-Cox).

Se ajustaron seis modelos o ecuaciones de volumen total por árbol utilizadas en el género *Populus* (Maggio y Cellini 2016) y el modelo utilizado por Benítez *et al.* (2017) en el primer inventario de plantaciones de Cuyo. En este último caso, se parametrizó la ecuación en función de los datos de este estudio y se utilizó el *F* calculado para cada clon (cuadro 2).

El modelo 1 representa una ecuación local de volumen, mientras que los modelos 2 a 6 pueden considerarse funciones generales o estándar de volumen.

En primera instancia se evaluó el supuesto de normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la confección de gráficos cuantil-cuantil (Q-Q plot), usando como distribución teórica la normal. El ajuste de los modelos se realizó mediante técnicas de regresión lineal con la

función lm de R 3.5.3 (R Development Core Team 2019) mientras que los gráficos Q-Q plot y de distribución de los residuos se realizaron mediante las librerías car y MASS del mencionado programa. Dado que los modelos 1 y 2 corresponden a expresiones matemáticas exponenciales, las mismas fueron linealizadas mediante la función logarítmica.

La evaluación de la bondad de ajuste de los modelos se basó en la obtención del coeficiente de determinación ajustado (*r*²ajust.) y raíz del error cuadrático medio (RMSE según su acrónimo en inglés). Además, se tuvo en cuenta la significancia de las estimaciones de los parámetros ($\alpha = 0,05$), el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC). Dado que estos estadísticos se basan en la estimación de los parámetros por ajuste de máxima verosimilitud (del inglés *maximum likelihood*) lo que no corresponde a regresiones lineales en donde se utiliza el ajuste por cuadrados mínimos (del inglés *ordinary least squares*, OLS), para el cálculo de AIC y BIC se emplearon las ecuaciones propuestas por Fox (2015) para su estimación en un entorno OLS. Se buscó que el *r*²ajust. sea lo más elevado posible y que RMSE, AIC y BIC se minimizaran. La evaluación de la capacidad predictiva de las ecuaciones de volumen ajustadas se realizó utilizando la muestra con la cual se realizaron los ajustes (autovalidación). Se calcularon el error promedio (\bar{E}), error absoluto promedio (\bar{EA}), error porcentual promedio ($\bar{E}\%$) y el error absoluto porcentual promedio ($\bar{EA}\%$). Según estos criterios, un modelo es mejor que otro si presenta menor valor de error, ya sea en unidades o porcentaje, sin considerar el signo.

Por último, para evaluar la posibilidad de utilizar un único modelo para los dos clones (objetivo 3), se ajustó aquella ecuación con el mejor nivel de ajuste individual con la base de datos completa ('Conti 12' + 'Guardi') y se evaluó la significancia de la variable clon (categórica, con dos niveles: 'Conti 12' y 'Guardi') mediante un análisis de

Cuadro 2. Ecuaciones de volumen ajustadas para la estimación del volumen de fuste total de árboles de *Populus x canadensis* 'Conti 12' y 'Guardi'.

Individual stem volume equations fitted for *Populus x canadensis* 'Conti 12' and 'Guardi'.

#	Nombre / tipo de modelo	Expresión matemática	Utilizado en <i>Populus</i> por
1	Función local o de Berkhout (Prodan <i>et al.</i> 1997, Kershaw Jr. <i>et al.</i> 2016)	$v = b_0 \times DAP^{c_1}$	(Peri 1994)
2	Schumacher-Hall (Schumacher y Hall 1933)	$v = b_0 \times DAP^{c_1} \times HT^{c_2}$	(Pece <i>et al.</i> 2002, Fernández Tschieder <i>et al.</i> 2011)
3	Variante de la función estándar con factor de forma constante (Kershaw Jr. <i>et al.</i> 2016)	$v = b_0 \times DAP^2 \times HT \times F$	(Benítez <i>et al.</i> 2017)
4	Polinómica	$v = a + b_0 \times DAP^2 + b_1 \times DAP^2 \times HT + b_2 \times HT$	(Suárez y García Volonté 1993)
5	Polinómica	$v = a + b_0 \times DAP + b_1 \times HT$	(Denegri y Marlats 1991)
6	Polinómica	$v = a + b_0 \times DAP^2 + b_1 \times HT$	(Denegri y Marlats 1991)
7	Polinómica	$v = a + b_0 \times DAP^2$	(Marquina <i>et al.</i> 1997)

la covarianza (ANCOVA). Luego, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) entre el ajuste del modelo que incluyó la variable clon y otro, sin su inclusión para evaluar la existencia de diferencias significativas entre ellos.

RESULTADOS

El factor de forma artificial promedio (F) para el clon ‘Conti 12’ resultó 0,44 (SE = 0,005, n = 56) mientras que para el clon ‘Guardi’ fue de 0,38 (SE = 0,001, n = 21). La comparación de medias evidenció que los factores de forma artificial de los clones ‘Conti 12’ y ‘Guardi’ se diferencian significativamente ($t = 7,492; P < 0,01$).

A través del análisis de los residuos estudentizados del ajuste de los modelos para los dos clones demostró que los

mismos se distribuyen dentro del intervalo de confianza del 95 % (figura 1). Por lo tanto, mediante la evaluación gráfica de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza no se detectaron evidencias que hicieran suponer un incumplimiento de los supuestos por lo que se validó el uso de métodos de ajuste paramétricos en los siete modelos.

En la mayoría de los casos, las variables predictoras del volumen resultaron significativas en los modelos ajustados para los dos clones. Sin embargo, el coeficiente b_0 del modelo 2 para ‘Conti 12’ e intercepto (a) y coeficiente b_2 del modelo 4 tanto para los datos de ‘Conti 12’ y ‘Guardi’ no resultaron significativamente diferentes de 0 (cuadro 3). Los siete modelos presentaron muy altos indicadores de ajuste tanto para ‘Conti 12’ (cuadro 4) como para ‘Guardi’ (cuadro 5),

Cuadro 3. Parámetros de los siete modelos de volumen de fuste total con corteza ajustadas para *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ y ‘Guardi’.

Coefficient of the seven total stem volume (with bark) models adjusted for *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ and ‘Guardi’.

#	‘Conti 12’						‘Guardi’					
	a	b_0	b_1	b_2	c_1	c_2	a	b_0	b_1	b_2	c_1	c_2
1†		24,334*			2,751*			15,985*			2,756*	
2†		1,159			2,196*	0,705*		0,061*			1,649*	1,368*
3		0,773*						6,183*				
4	-0,033	5,317*	0,144*	0,000			-0,034	-1,543	0,326*	0,005		
5	-0,321*	3,639*	-0,003				-0,498*	1,599*	0,024*			
6	-0,091*	8,802*	0,003				-0,325*	3,893*	0,023*			
7	-0,057*	9,309*					-0,115*	7,656*				

*Parámetros significativamente diferentes de cero ($\alpha = 0,05; P < 0,05$).

† Coeficientes retransformados a su expresión original (unidades originales) exponencial tras el ajuste lineal.

Cuadro 4. Estadísticos de ajuste y de autovalidación de los siete modelos de volumen total individual ajustados para el clon *Populus x canadensis* ‘Conti 12’.

Fit and validation statistics of the seven models of total stem volume for *Populus x canadensis* ‘Conti 12’.

Modelo	Indicadores de ajuste				Indicadores de autovalidación			
	r^2 ajust.	RMSE	AIC	BIC	\bar{E} (m ³)	\bar{E} %	\bar{EA} (m ³)	\bar{EA} %
1	0,984	0,040	-329.9	-325.8	-0,002	-0,7	0,030	9,4
2	0,992	0,032	-365.3	-359.2	0,000	-0,4	0,024	6,7
3	0,993	0,035	-373.5	-371.5	0,002	0,4	0,025	6,8
4	0,976	0,029	-388.5	-380.4	0,000	2,4	0,023	9,7
5	0,942	0,046	-339.9	-333.8	0,000	21,7	0,035	34,5
6	0,972	0,032	-380.9	-374.8	0,000	8,6	0,024	16,2
7	0,971	0,032	-380.1	-376.0	0,000	4,1	0,025	12,9

r^2 ajust: coeficiente de determinación ajustado; RMSE: raíz del error cuadrático medio; AIC: criterio de información de Akaike; BIC: criterio de información bayesiano; \bar{E} : error promedio; \bar{E} %: error porcentual promedio; \bar{EA} : error absoluto promedio; \bar{EA} %: error absoluto porcentual promedio.

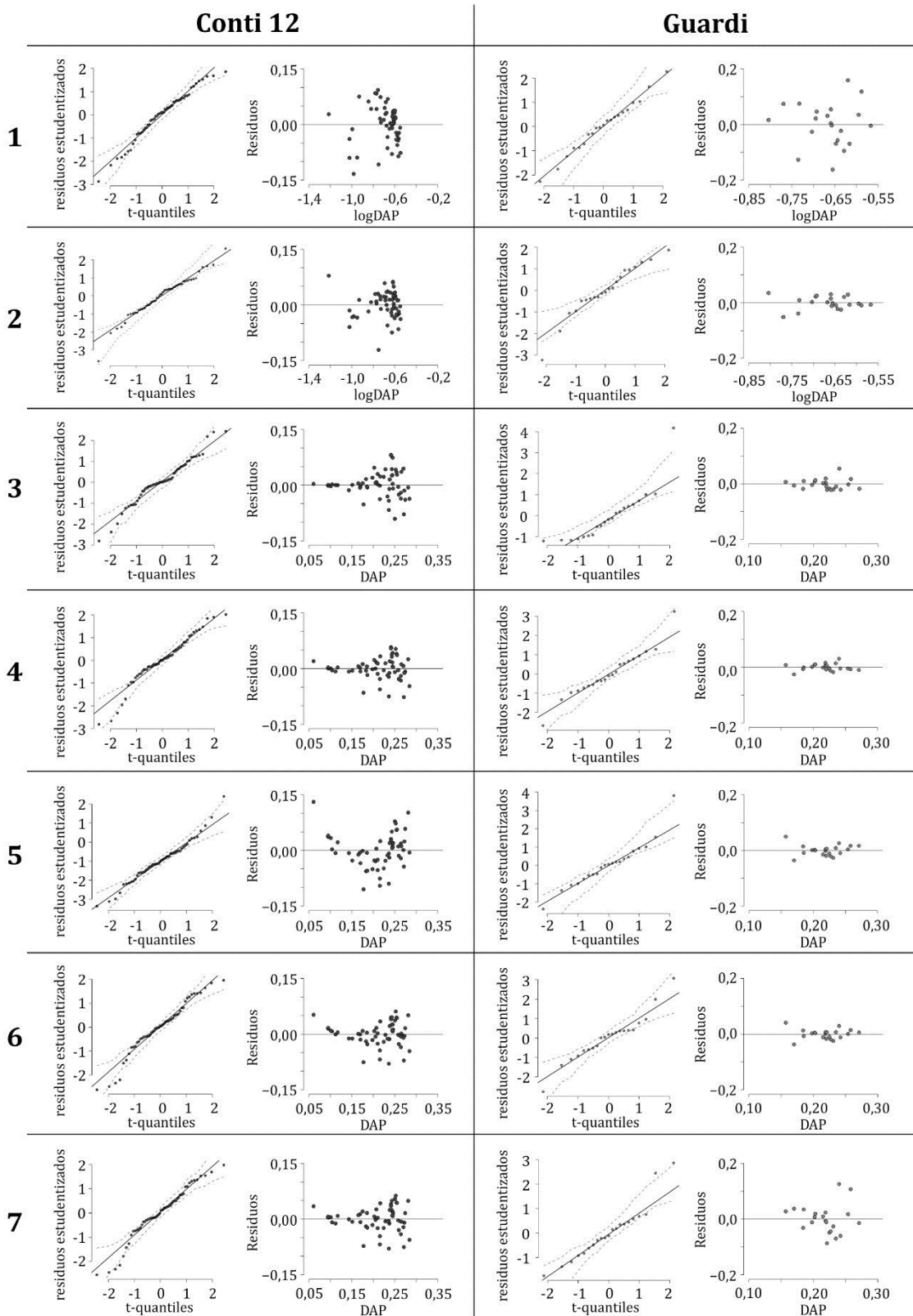


Figura 1. Gráficos cuantil-cuantil (*QQ*-plots) y distribución de los residuos estandarizados para cada uno los siete modelos ajustados para los dos clones ('Conti 12' y 'Guardi'). En los *QQ* plots, las líneas punteadas representan el intervalo de confianza del 95 %.

Quantile-quantile or *QQ*-plots and distribution of residuals for the seven models fitted on the two clones ('Conti 12' and 'Guardi'). In the *QQ* plots, dotted lines represent the 95% confidence interval.

sin grandes diferencias entre los indicadores de ajuste entre los siete modelos ajustados. Sin embargo, en términos del coeficiente de determinación ajustado, los modelos 2 y 3 se destacaron levemente sobre el resto. En relación al AIC y BIC, ambos indicadores mostraron un ajuste levemente mejor del modelo 4 sobre los restantes seis. Los indicadores de autovalidación mostraron la superioridad del modelos 2 y 3, destacándose levemente el modelo 2 sobre el modelo 3 que, para ‘Conti 12’ y ‘Guardi’, mostró menores valores de error absoluto porcentual promedio (6,7 y 4,2 %, respectivamente). En términos de distribución por clases diamétricas, los modelos 2 y 3 mostraron un error equilibrado para ambos clones (figura 2) lo que constituye una muy marcada superioridad en comparación con el sesgo mostrado por los otros modelos especialmente para la menor categoría de tamaño. Dado que los indicadores de ajuste y autovalidación presentaron diferencias casi imperceptibles para los modelos 2 y 3 en ambos clones, la consideración del principio de parsimonia en términos estadísticos (ponderación por el menor número de variables o simpleza del modelo) favorecería la elección del 2 sobre el 3.

En consecuencia, se decidió ajustar el modelo 2 con la base de datos completa (‘Conti 12’ + ‘Guardi’) y evaluar la significancia de la variable clon (categórica, con dos niveles: ‘Conti 12’ y ‘Guardi’) para dar respuesta al objetivo 3 de este estudio. La visualización pareada de las variables VTcc-DAP y VTcc-HT permitió distinguir un ordenamiento diferencial por clon, siendo más clara esta distinción para la variable DAP que para HT (figura 3). El ajuste del modelo indicó que la variable clon es altamente significativa ($P < 0,01$) y el análisis de la varianza (ANOVA) entre el ajuste de un modelo que incluye esta variable y otro sin su inclusión determinó que los mismos son significativamente diferentes ($P < 0,01$). Por otra parte, los indicadores de ajuste (r^2 ajust, AIC y BIC) fueron superiores para el modelo que incluyó a la variable clon.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente estudio sugiere que los clones *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ y ‘Guardi’ creciendo en plantaciones bajo riego en el valle de Uco, provincia de Mendoza, poseen diferentes factores de forma artificial y que el cálculo de los volúmenes individuales debe realizarse mediante ecuaciones ajustadas individualmente.

Los factores de forma para los dos clones resultaron inferiores al valor de 0,54 utilizado por la empresa forestal Cuyoplacas en la región. Esto implicaría que la utilización de este valor ha estado sobrestimando el volumen total individual. Por otra parte, los valores obtenidos difieren significativamente entre clones por lo que no sería correcta la utilización de un único factor de forma para los clones ‘Conti 12’ y ‘Guardi’. El factor de forma del ‘Guardi’ resultó muy similar al valor promedio (0,391) para diferentes clones de álamo cultivados en la región del Delta del río Paraná, Argentina encontrado por Cortizo *et al.* (2005). En relación a estos valores, el valor registrado en ‘Conti 12’ resultó exactamente igual al del clon *P. deltoides* ‘I 72/51’ (0,449). Cabe destacar que el factor de forma calculado para ‘Conti 12’ se asemeja al valor reportado por Benítez *et al.* (2017) en el primer inventario de plantaciones forestales para Cuyo (0,45).

A excepción de los modelo 1 y 7, el resto de los modelos presentó coeficientes de determinación ajustados superiores a 0,94 tanto para ‘Conti 12’ como ‘Guardi’ lo cual indica un alto nivel de variabilidad explicada por los mismos. Entre estas cinco opciones, los modelos 2 y 3 se destacaron por su superioridad tanto en nivel de ajuste como de autovalidación. Respecto a este último grupo de indicadores, los dos modelos tuvieron valores muy bajos de error y sobre todos los aspectos, no mostraron sesgo o error diferencial en función de la clase de tamaño lo cual otorga mayor versatilidad y confianza que los otros modelos.

Cuadro 5. Estadísticos de ajuste y de autovalidación de los siete modelos de volumen total individual calibrados para el clon *Populus x canadensis* ‘Guardi’.

Fit and validation statistics of the seven model of total stem volume for *Populus x canadensis* ‘Guardi’.

Modelo	Indicadores de ajuste				Indicadores de autovalidación			
	r^2 ajust.	RMSE	AIC	BIC	\bar{E} (m ³)	\bar{E} %	\bar{EA} (m ³)	\bar{EA} %
1	0,803	0,051	-103.8	-101.7	0,005	-1,6	0,036	14,2
2	0,982	0,012	-153.4	-150.3	0,000	-0,1	0,009	4,2
3	0,995	0,018	-166.0	-165.0	-0,002	-1,5	0,014	6,0
4	0,984	0,012	-176.7	-172.5	0,000	-0,3	0,010	4,4
5	0,965	0,046	-161.1	-158.0	0,000	0,7	0,014	7,5
6	0,971	0,017	-164.8	-161.7	0,000	0,6	0,013	6,9
7	0,753	0,051	-121.0	-118.9	0,000	-2,2	0,039	16,6

r^2 ajust: coeficiente de determinación ajustado; RMSE: raíz del error cuadrático medio; AIC: criterio de información de Akaike; BIC: criterio de información bayesiano; \bar{E} : error promedio; \bar{E} %: error porcentual promedio; \bar{EA} : error absoluto promedio; \bar{EA} %: error absoluto porcentual promedio.

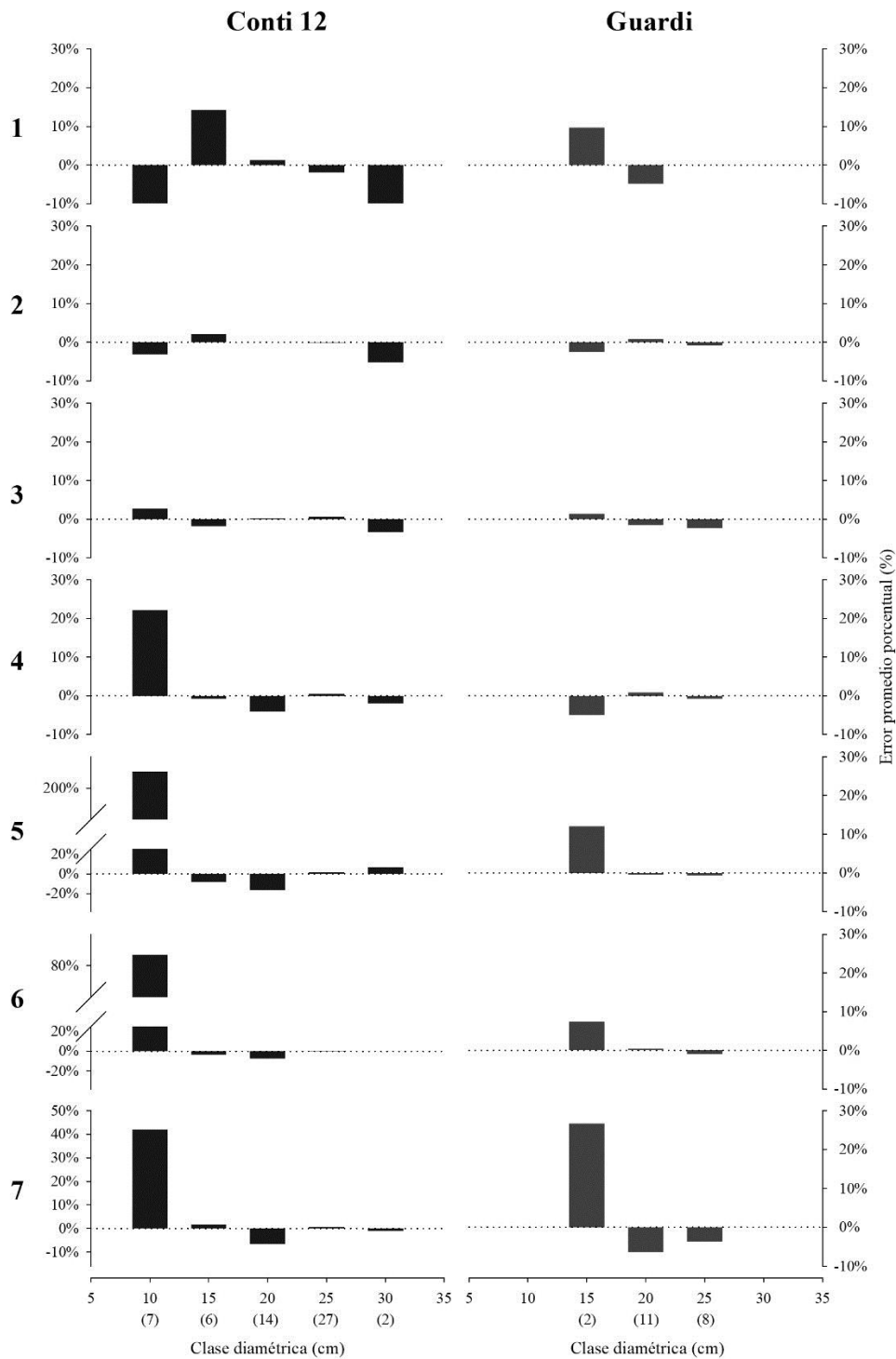


Figura 2. Error porcentual promedio por clase diamétrica para los siete modelos para la estimación del volumen total de fuste con corteza de *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ (panel izquierdo) y ‘Guardi’ (panel derecho) en el valle de Uco, Pcia. de Mendoza. En el eje x se presenta el punto medio de cada clase diamétrica. Además, se indica el número de árboles en cada clase diamétrica entre paréntesis. Nótese la diferente escala vertical de los modelos 5, 6 y 7 para el clon ‘Conti 12’.

Mean percentage error by diameter classes for the seven models for the estimation of the individual total stem volume (with bark) of *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ (left panel) and ‘Guardi’ (right panel) in Uco Valley, Mendoza Province. The x-axis shows the midpoint of each diameter class. In addition, the number of trees in each diameter class is indicated in parentheses. Note the different vertical scale of models 5, 6 and 7 for ‘Conti 12’ clone.

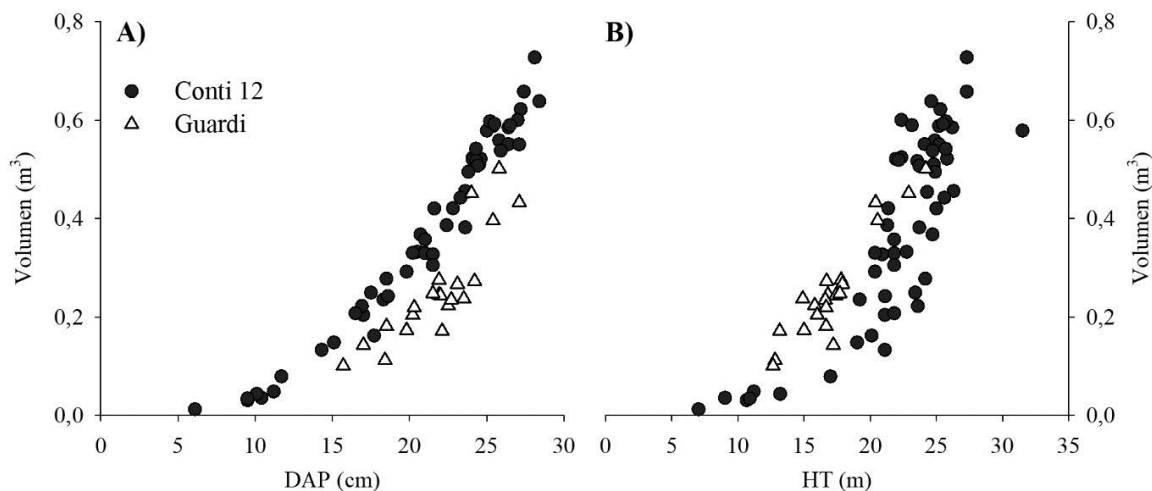


Figura 3. Volumen observado de fuste total individual con corteza (m³) de *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ (círculos) y ‘Guardi’ (triángulos) en relación al diámetro a 1.3 m –DAP- (A) y altura total –HT- (B).

Individual stem volume with bark (m³) of *Populus x canadensis* ‘Conti 12’ (circles) and ‘Guardi’ (triangles) in relation to the diameter at breast height -DAP- (A) and total height -HT- (B).

Tal como fuera planteado previamente, la preferencia entre el modelo 2 o 3 resulta muy difícil debido al excelente desempeño de los dos modelos para ambos clones. Por lo tanto, el error levemente menor encontrado en el modelo 2 y la necesidad de contar con dos variables en lugar de tres requeridas por el modelo 3, permitiría inclinar la decisión por el primero. Por otra parte, del modelo 3 se podría cuestionar el uso de un factor de forma generalizado en cada clon como una variable fija cuando está demostrado que este parámetro generalmente disminuye con el aumento del DAP y la altura total tal como fuera observado por Pollanschütz (1965) y recientemente por Tenzin *et al.* (2016). Clutter *et al.* (1983) han dado diversas razones por las que se prefieren los modelos que utilizan solo el diámetro y la altura ya que las mismas explican a menudo gran parte de la variación de volumen causada realmente por las diferencias de forma. Por otra parte, Behre (1927, 1935) y Smith *et al.* (1996) concluyeron que no se obtiene ninguna ventaja práctica del uso de un factor de forma además del DAP y la altura. También, es importante destacar que este parámetro varía levemente en forma individual por lo que sería cuestionable su utilización como una constante en un modelo de volumen.

Los niveles de ajuste alcanzados por el modelo 2 en la presente base de datos resultaron en valores similares a los encontrados recientemente por Hjelm y Johansson (2012) en Suecia en una comparación de ajuste de siete ecuaciones de volumen para cuatro clones de *Populus* (r^2 : 0,984-0,997), por Fortier *et al.* (2017) en Canadá para un clon que deriva de *P. x canadensis* con cuatro modelos de estimación de volumen de fuste ($r^2 = 0,961 - 0,994$) e incluso para experiencias locales en otros clones de *Populus* en Argentina por Pece *et al.* (2002) ($r^2 = 0,988$) y Fernández Tschieder *et al.* (2011) ($r^2 = 0,984$). En este último

caso, el error absoluto porcentual promedio obtenido para *P. deltoides* en el Delta del Paraná 6,8 % fue prácticamente igual al alcanzado en este estudio para ‘Conti 12’. De esta forma, se sigue demostrando que el modelo logarítmico desarrollado por Schumacher y Hall (1933) continúa siendo sumamente versátil y vigente tras 85 años de su primera implementación en la actividad forestal.

La visualización gráfica de la base de datos completa y el análisis de la significancia de la variable categórica “clon” en el modelo 2 justifican la utilización de modelos diferentes para cada clon. Cabe aclarar que transformación logarítmica para la realización de su regresión lineal conlleva a un sesgo o discrepancia (Baskerville 1972). En función esto, fue utilizada la ecuación propuesta por Newman (1993) que permite estimar el término 10^e que corrige este sesgo. En ambas situaciones el ajuste resultó casi despreciable ($10^e_{Conti12} = 1,0012$ y $10^e_{Guardi} = 1,0001$). Por lo tanto, luego de multiplicar b_0 por 10^e , la expresión matemática del modelo 2 recomendado para estimar el VTcc del clon ‘Conti 12’ es:

$$VT_{ccConti\ 12} = 1,161 \times DAP^{2,196} \times HT^{0,705} \quad [2]$$

mientras que en el caso del clon ‘Guardi’, la expresión matemática es la siguiente:

$$VT_{ccGuardi} = 0,061 \times DAP^{1,649} \times HT^{1,368} \quad [3]$$

donde VTcc: volumen total con corteza (m³), DAP: diámetro a 1,30 m de altura (m) y HT: altura total (m).

Cabe aclarar que en el caso de ‘Conti 12’, las diferencias de los indicadores de ajuste y autovalidación entre los

modelos 1 y 2 no resultaron muy grandes por lo que, si se considera que el 1 solamente requiere medir una variable (DAP), podría recomendarse su uso en condiciones de campo en las que no pueda medirse la altura de los individuos por escasez de tiempo o falta de equipamiento específico.

En conclusión, se rechaza la hipótesis que condujo este estudio permitiendo afirmar que los clones 'Conti 12' y 'Guardi' poseen diferentes factores de forma artificial y la estimación de sus volúmenes individuales debe realizarse mediante ecuaciones ajustadas individualmente tal como han sido presentadas en este trabajo. Por último, se destaca la necesidad de continuar la medición de una mayor cantidad de árboles para extender el rango de tamaños de árboles analizados y permitir la validación cruzada e independiente con datos utilizados para la parametrización.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en el marco del Proyecto de Investigación Aplicada PIA 14004 del Ministerio de Agroindustria de la Nación. Se agradece especialmente a Cuyoplacas SA, Luis Leiva (Cuyoplacas SA), Carleti SA, Lisandro Bourguet (Carleti SA), Osvaldo Leonangeli, Silvia Petkovic y Ricardo Carleti por permitir la medición de los árboles al momento del aprovechamiento de sus respectivas plantaciones. Por último, deseamos agradecer los comentarios y sugerencias realizadas por los tres revisores anónimos que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

REFERENCIAS

- Amico I, J Bava, AD Calderón. 2009. Tabla de volumen para *Populus nigra* cv 'Italica' en plantaciones lineales en el noroeste de Chubut. Jornadas de Salicáceas 2009 - II Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Consultado 8 ene. 2019. Disponible en: <https://jornadasdesalicaceas2009.blogspot.com/p/trabajos-tecnicos.html>
- Baskerville GL. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 2(1): 49-53. DOI: [10.1139/x72-009](https://doi.org/10.1139/x72-009).
- Behre CE. 1927. Form-class taper curves and volume tables and their application. *Journal of Agricultural Research* 35: 673-744.
- Behre CE. 1935. Factors involved in the application of form-class volume tables. *Journal of Agricultural Research* 51: 669-713.
- Benítez R, M Gaute, J Poch, P Bosio, A Demarco, M Ciccale-Smit, G Sciortino, N Tripodi, M Sabi, N Acosta, M Rugura, P Rivolta, E Avogradro, A Pla, C De Titto, G Spinetto, N Naves, MJ Nosetti. 2017. Inventario de Plantaciones bajo riego, Región Cuyo. Buenos Aires, Argentina. Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial - Ministerio de Agroindustria. 27 p.
- Cailliez F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, Italia. FAO. 92 p.
- Calderón AD. 2006. Silvicultura y situación de los álamos en Cuyo. Jornadas de Salicáceas 2006 - I Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Consultado 8 ene. 2019. Disponible en: <https://jornadasdesalicaceas2006.blogspot.com/p/disertaciones.html>
- Calderón AD. 2010. Forestación con álamos para la obtención de madera de calidad. Mendoza, Argentina. Cátedra de Dasonomía - Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. 24 p.
- Calderón AD, NE Riu, JA Bustamante, SA Pérez, RP Zanetti. 2009. Comportamiento de clones de álamos en San Carlos, Mendoza. Jornadas de Salicáceas 2009 - II Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Consultado 8 ene. 2019. Disponible en: <https://jornadasdesalicaceas2009.blogspot.com/p/trabajos-tecnicos.html>
- Clutter JL, JC Fortson, LV Pienaar, GH Brister, RL Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. New York, USA. John Wiley. 333 p.
- Cortizo S, E Borodowski, L Landi, V Mema. 2005. Alometría y destino comercial en clones de álamo. Actas de las XX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina. EEA INTA Concordia. p. 1-9.
- Denegri G, RM Marlats. 1991. *Populus deltoides*: modelo matemático aplicado a la construcción de una tabla de volumen para el Delta Bonaerense. In VI Jornadas Técnicas: inventarios, modelos de producción y crecimiento forestales. Eldorado, Misiones. p. 49-56.
- Fernández Tschieder E, HE Fassola, M García Cortés. 2011. Ecuación de volumen total para *Populus deltoides* de plantaciones del Bajo Delta del Paraná. *RIA* 37(2): 172-179.
- Fortier J, B Truax, D Gagnon, F Lambert. 2017. Allometric equations for estimating compartment biomass and stem volume in mature hybrid poplars: General or site-specific? *Forests* 8(9): 309. DOI: [10.3390/f8090309](https://doi.org/10.3390/f8090309).
- Fox J. 2015. Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models. Third Edition. Thousand Oaks, California, EE.UU. SAGE Publications. 816 p.
- Hjelm B, T Johansson. 2012. Volume equations for poplars growing on farmland in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(6): 561-566. DOI: [10.1080/02827581.2012.679678](https://doi.org/10.1080/02827581.2012.679678).
- Kershaw Jr. JA, MJ Ducey, TW Beers, B Husch. 2016. Forest mensuration. 5th Edition. Chichester, Inglaterra. Wiley-Blackwell. 630 p.
- Maggio AD, JM Cellini. 2016. Recopilación de ecuaciones de volumen y biomasa de especies forestales de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 219 p.
- Marquina J, R Bratovich, RM Marlats. 1997. Funciones de volumen útil con corteza para clones de *Populus deltoides* Marsh de plantaciones en la zona continental de la provincia de Buenos Aires. *Revista de Investigaciones Agropecuarias, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* 28(2): 65-72.
- Newman MC. 1993. Regression analysis of log-transformed data: Statistical bias and its correction. *Environmental Toxicology and Chemistry* 12(6): 1129-1133. DOI: [10.1002/etc.5620120618](https://doi.org/10.1002/etc.5620120618).
- Pece MG, C Gaillard de Benítez, MJ de Galíndez, NA Ríos. 2002. Tabla de volumen de doble entrada para álamos de la zona de riego de Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho* 9: 95-105.
- Peri PL. 1994. Ecuaciones de volumen total para tres especies de salicáceas en Ea. «La Julia», provincia de Santa Cruz, Argentina. Publicación Técnica Forestal No 2. Río Gallegos, Argentina. UNPA-INTA-CAP. 14 p.

- Peri PL, G Martínez Pastur. 1998. Crecimiento en cortinas cortaviento de *Populus nigra* cv «italica» en Patagonia Sur (Argentina). *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 7(1-2): 73-83.
- Pollanschütz A. 1965. A new method of determining stem form factors of standing trees. In Proceedings of the 2nd conference of the International Advisory Group of Forest Statisticians, IUFRO. Stockholm, Sweden. Institutionen for Skoglig Matematisk Statistik. p. 266-276.
- Prodan M, R Peters, F Cox, P Real. 1997. Mensura forestal. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. 586 p.
- R Development Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. Vienna. R Foundation for Statistical Computing.
- Riu NE, JA Bustamante, AD Calderón, SA Pérez, V Settepani, RP Zanetti. 2008a. Comportamiento de clones de álamos en San Carlos. Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* XL(1): 79-83.
- Riu NE, V Sanjurjo, V Settepani. 2008b. Requerimiento hídrico en álamos de siete años de edad Rivadavia, Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* XL(2): 19-24.
- Schumacher FX, DS Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47(9): 719-734.
- Smith DM, BC Larson, MJ Kelty, PMS Ashton. 1996. The practice of Silviculture: applied forest ecology. 9th edición. New York, USA. John Wiley. 537 p.
- Suárez EA, R García Volonté. 1993. Tablas de volumen para álamos del Delta Bonaerense. In Primer Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Comisión 4: Ciencia y técnica aplicada. Paraná, Entre Ríos, Argentina. p. 266-272.
- Tenzin J, T Wangchuk, H Hasenauer. 2016. Form factor functions for nine commercial tree species in Bhutan. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 90(3): 359-366. DOI: [10.1093/forestry/cpw044](https://doi.org/10.1093/forestry/cpw044).

Recibido: 09/01/19
Aceptado: 10/06/19