

Estimación del crecimiento y producción de una plantación de paraíso gigante (*Melia azedarach* var. *gigantea*) sin riego en la Provincia de Santiago del Estero, Argentina.

*Estimating growth and yield in a Chinaberry tree (*Melia azedarach* var. *gigantea*) plantation without irrigation in the Province of Santiago del Estero, Argentina*

C. Gaillard de Benitez¹; M. Pece¹; M. Juárez de Galíndez¹; N. Ríos¹

Recibido en octubre de 2000; aceptado en mayo de 2000

RESUMEN

Para incentivar la forestación con especies exóticas se debe tener un mínimo conocimiento de su comportamiento en zonas de características similares a las del lugar donde serán implantadas, en especial en zonas de riesgo como lo son las semiáridas. El objetivo de este trabajo es predecir el crecimiento y producción de una plantación de paraíso gigante sin riego ubicada en el noreste de Santiago del Estero, en el Parque Chaqueño Seco. Se utilizó el modelo de Sullivan y Clutter cuyos parámetros fueron estimados a partir de datos obtenidos en tres mediciones anuales de la plantación (de los siete a los nueve años de edad). Con el sistema resultante, se estimó, para una edad de corta de 30 años, volúmenes de entre 50 y 110 m³/ha, partiendo de áreas basales iniciales de entre 6 y 12 m²/ha a los siete años de edad. Para determinar la calidad de sitio se utilizó la función de Chapman-Richards.

Palabras Clave: *Melia azedarach*, crecimiento, modelo de Sullivan y Clutter, Parque Chaqueño Seco, índice de sitio.

ABSTRACT

To encourage afforestation with exotic trees species, it is necessary a minimum knowledge of their behavior in areas with similar characteristics to those of the plantation sites, especially in risky, semiarid zones. The objective of this study is to predict growth and yield in a Chinaberry tree plantation without irrigation located in northeastern Santiago del Estero, in the semiarid Chaco Region. The Sullivan and Clutter model was used. Its parameters were estimated from data obtained in three annual measurements of the plantation (seven to nine years old). With the resulting two-equation system, a yield of 50 to 110 m³/ha was predicted, in a 30-year rotation, from an initial basal area of 6 to 12 m²/ha, at seven years of age. The Chapman-Richards function was used to determine site quality.

Key words: *Melia azedarach*, growth, Sullivan and Clutter model, Semiarid Chaco Region, site index.

1. INTRODUCCION

El conocimiento de la dinámica del crecimiento de las masas forestales constituye la información básica para el cálculo de la rentabilidad de su producción, la toma de decisiones referidas a la conveniencia o no de la implantación de especies exóticas, y la planificación para el asentamiento de industrias que utilicen su madera como materia prima. De esta manera, la forestación contribuye al desarrollo de la región. El fomento de las plantaciones forestales en una zona determinada debe, por lo tanto, estar respaldado por una estimación fundamentada de su

¹ Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912. 4200 Santiago del Estero. Argentina. Tel./Fax: (0385)450-9550. E-Mail: benitez@unse.edu.ar

crecimiento, en especial si se trata de masas que se instalan bajo secano en ambientes como los que se presentan en el Parque Chaqueño Seco.

En el Noreste de la Provincia de Santiago del Estero existe una plantación de paraísos (*Melia azedarach* var. *gigantea*) en las condiciones arriba mencionadas. Al inicio del proyecto de investigación, en cuyo marco se desarrolla este trabajo, solo se encontró un antecedente aplicable a ella y es el debido a Ortin et al. (1988) en donde se presentan los resultados de las mediciones en algunas parcelas que crecieron en condiciones similares a las del Chaco Semiárido: precipitaciones medias anuales entre 500 y 700 mm y vegetación correspondiente a un Bosque de Transición entre el Parque Chaqueño Seco y la Selva Tucumano-Boliviana. Los incrementos que se informan van desde 2.7 m³/ha/año a los 8 años de edad hasta 11.85 m³/ha/año a los 4 años en diferentes parcelas.

En la provincia de Misiones, Larguía (1971) y Rey (1976) dan algunos valores los que, comparados con los de la plantación en estudio a los ocho años, sugirieron para esta última, perspectivas muy optimistas (Pece et al., 1996) .

Esta plantación constituye por su superficie la de mayor importancia en la zona de secano de la provincia de Santiago del Estero. Por esta razón y por la escasez de antecedentes aplicables a ella, se la eligió para ser monitoreada en su crecimiento mediante la medición de parcelas permanentes con el propósito de estimar su producción futura aplicando un modelo de crecimiento y producción.

Una clasificación gruesa de los modelos de crecimiento, según van Laar y Akça, 1997 (citando a Munro) es la siguiente: de árboles individuales y de rodales. Estos últimos, fueron los primeros en surgir en forma de tablas de rendimiento en el siglo XVIII y han evolucionado mucho desde entonces. Se iniciaron como simples ecuaciones hasta llegar a sistemas de ecuaciones que originan modelos compatibles como el desarrollado por Sullivan y Clutter en 1972 en los que se relacionan la productividad con la edad, la calidad del sitio y la densidad de la masa expresada por el área basal.

La remediación de parcelas permanentes proporciona datos de valor para modelar el crecimiento de la masa forestal ya que permite utilizar información procedente de unos pocos años y no de toda la historia de la masa. Si embargo, la remediación ocasiona autocorrelación en las variables. La forma de solucionar este problema es efectuar el ajuste utilizando el método de mínimos cuadrados en dos y tres etapas (Pece, 1993 y van Laar, 1991)

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos al aplicar el sistema propuesto por Sullivan y Clutter para predecir la producción y el crecimiento de *Melia azedarach* var. *gigantea* en el Parque Chaqueño Seco y sin riego.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción de la plantación en estudio

La plantación de paraísos estudiada pertenece al establecimiento agropecuario-forestal "La Brava" ubicado sobre la ruta provincial N° 6, en el Departamento Alberdi, provincia de Santiago del Estero. Las coordenadas del lugar son aproximadamente 26° 23' de Latitud Sur y 61° 48' de Longitud Oeste. La plantación se encuentra distribuida en dos sectores de la propiedad, el identificado como zona 1, de 25 has y la zona 2 de 100 has aproximadamente.

La plantación fue efectuada a un distanciamiento 4,0 m x 4,0 m con plantines traídos de la

provincia de Misiones en el año 1986. Los arbolitos recibieron un riego de asiento en el momento de su implantación. Se efectuaron algunas limpiezas consistentes una vez en rastreado y luego desmalezado. Las podas se realizaron manualmente y luego con tijera hasta los 5 años. A los 8 años fue necesario podar con serrucho.

En 1996 ante la sospecha de la presencia de una enfermedad que ataca plantaciones en Misiones y es conocida como “paraíso moro”, se solicitó la colaboración de especialistas del Laboratorio de Fitopatología de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero detectándose rajaduras por heladas. En algunas plantas con síntomas de decaimiento, clorosis y/o puntas muertas, se tomaron muestras y, aunque no se tuvo éxito con los aislamientos del agente causal, las observaciones efectuadas permiten asegurar la presencia de polífago asociado a diversos géneros y de penetración por heridas cuya presencia fuera citada para la provincia de Misiones por Vizcarra Sánchez y Deschamps (1983).

En el mismo año se enviaron tablas al Instituto de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales, para la realización de ensayos físico-mecánico y su caracterización tecnológica. La madera se encontró en estado fitosanitario deficiente, con presencia de gran cantidad de nudos. A pesar de ello se calificó la madera con aptitudes para los siguientes usos: persianas y cortinas, ventanas y puertas macizas exteriores y, placares y mueblería en general.

Cuando la plantación contaba con ocho años de edad, se apearon siete árboles para realizar el análisis epidométrico de los fustes y se determinaron las curvas de los incrementos anuales medio y corriente. Las curvas de incremento en volumen de los árboles apeados, si bien no presentaron el corte de las curvas de incrementos medio y corriente, mostraron la necesidad de efectuar un raleo. En ese momento, la densidad media era de 460 árboles por hectárea. Este valor es alto si se lo compara con el máximo de 250 que indica Larguía (1971) a partir del séptimo año, para la provincia de Misiones, la que presenta precipitaciones que van desde 1600 a 2000 mm anuales (Volkart, 1980). Larguía aconseja para los edades de 6 y 8 años, 170 y 120 árboles por hectárea respectivamente, los que representan, según los diámetros medios que él estima para esas edades (30 y 40 cm), 12 y 15 m²/ha.

Clima

La zona corresponde a la región fitogeográfica del Chaco semiárido. Según Boletta *et al.*, (1989), todo el territorio de la provincia de Santiago del Estero posee características semiáridas, con alta variabilidad de la precipitación anual, observándose grandes amplitudes térmicas y balance hídrico deficitario en todos los meses del año. Las estadísticas del Servicio Meteorológico Nacional determinan para la localidad de Pampa de los Guanacos, ubicada 35 km al norte de la plantación en estudio, los siguientes valores del período 1976 a 1988: mínima absoluta de -4.5° C, máxima absoluta de 45.4° C, temperatura media anual de 22.5° C, precipitación media anual de 827 mm, con valores extremos durante ese período de 1483 y 563 mm. La precipitación anual se concentra sumando aproximadamente 85% del total entre los meses de noviembre a abril.

La estación meteorológica de Pampa de los Guanacos fue levantada por lo que se recurrió a los datos proporcionados por la de Sachayoj a unos 30 km al sur de Coronel Rico. Los valores a partir del inicio del estudio, en 1994, fueron: 697, 438, 918 y 663 mm. La sequía prolongada, ocurrida cuando la plantación contaba ocho años de edad sumada a la alta densidad ocasionó en los árboles un fuerte stress hídrico.

En 1997 se aplicaron en las parcelas cuatro intensidades de raleo, dejando 10, 8, 6 y 4 m²/ha, con el objeto de lograr un mayor rango para la variable densidad.

Suelos

Para la descripción de los suelos se ubicó una calicata en el estrato 2. El paisaje corresponde a una planicie loésica, paleoplanicie aluvial del Río Salado. Se trata de suelos ligeramente evolucionados con un perfil típico A-C-AC, poco profundos sin estructura o débilmente estructurados. No presentan un horizonte de acumulación de arcilla y la textura es franco limosa, poseen buen drenaje, no habiéndose observado erosión.

El pH aumenta desde 7,8 en el horizonte A hasta 8,8 en C2. El tipo de suelo es Torriorthentic Haplustoll (Soil Survey Staff, 1992). Aunque pobres de por sí, no presentan ningún problema de carácter físico o químico para el normal desarrollo de los árboles, siendo el factor limitante la falta de agua.

Vegetación

La vegetación de la zona es la que corresponde a los bosques de quebracho, donde originariamente predominaban los quebrachos colorado (*Schinopsis lorentzii*) y blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*). La intensa explotación forestal y el pastoreo han transformado los bosques aumentando la importancia de las especies secundarias como el mistol (*Zizyphus mistol*), el chañar (*Geoffroea decorticans*) y otras que constituyen el segundo estrato arbóreo. El estrato arbustivo aumentó su riqueza y cobertura.

2.2 Mediciones y cálculos efectuados

Durante los cinco años que duró el estudio se realizaron los siguientes mediciones y cálculos, que comenzaron cuando la plantación tenía siete años de edad:

- Instalación y medición de 40 parcelas permanentes de 576 m².

En cada parcela, constituida por 4 filas de 9 árboles, se midieron con cinta los diámetros a la altura de pecho (d) de todos los ejemplares y con hipsómetro las alturas totales (h) de los árboles de las dos primeras filas. También se midieron las alturas totales de aquellos ejemplares que por su diámetro serían utilizados en el cálculo de la altura dominante (h_d). Esta última se definió como la media aritmética de los 100 árboles más gruesos por hectárea lo que corresponde, por el tamaño de las parcelas, a la media de los 6 árboles de mayor diámetro de cada una de ellas.

- Determinación de funciones para estimar la altura total.

Al no medirse todas las alturas, fue necesario estimarlas. Con este fin, todos los años se procedió al ajuste de una función para estimar la altura total en función de d y h_d . Se utilizó el método de mínimos cuadrados para probar diversos modelos, en donde las variables independientes fueron, además de las mencionadas, transformaciones y combinaciones de ellas. Para determinar si era suficiente una única ecuación para los dos estratos, se utilizó el programa 1R del paquete BMDP que prueba igualdad de regresiones mediante F .

- Determinación de funciones para estimar el volumen total.

A los 7 años de edad de la plantación se cubicaron en pie 158 árboles (mediante la medición del diámetro cada metro, utilizando escaleras). Con estos datos se realizaron ajustes y se seleccionó una función que permitió estimar el volumen total con corteza (v_t) de árboles individuales en función del diámetro a la altura de pecho (d) y de la altura total (h).

- Anualmente se efectuó el cálculo de valores descriptivos de la masa en cada parcela: \bar{d} , \bar{h} , h_d , número de árboles por hectárea (N), área basal en m^2/ha (AB) y volumen total en m^3/ha (V).
- Para determinar la capacidad productiva del lugar, se realizó el ajuste a la curva guía con el modelo biológico de Chapman-Richards. De este modo fue posible asignar una calidad de sitio a cada parcela y en cada año. El modelo es el siguiente:

$$\hat{h}_d = \hat{\mathbf{b}}_1 * (1 - e^{-\hat{\mathbf{b}}_2 * t})^{\hat{\mathbf{b}}_3}$$

Donde: $\hat{\mathbf{b}}_1$, $\hat{\mathbf{b}}_2$, $\hat{\mathbf{b}}_3$ son parámetros estimados, t representa a la edad y e es el número de Euler.

El ajuste se efectuó empleando el siguiente procedimiento:

Se dio un valor inicial a \mathbf{b}_2 en base a trabajos anteriores, se linealizó la función tomando logaritmos y se ajustó por mínimos cuadrados lineales al modelo resultante:

$$\ln \hat{h}_d = \ln(\hat{\mathbf{b}}_1) + \hat{\mathbf{b}}_3 \ln(1 - e^{-\hat{\mathbf{b}}_2 * t})$$

Luego se repitió el cálculo para otros valores de β_2 , hasta encontrar aquel que minimizara la suma de cuadrados de los errores. Con los valores de los parámetros obtenidos de esta manera, se corrió el programa AR del paquete estadístico BMDP versión 7.0, (Dixon, 1992), el que permite ajustar a modelos no lineales pero necesita de valores iniciales para los parámetros. Este programa no requiere especificar las derivadas del modelo y realiza el ajuste por mínimos cuadrados utilizando un algoritmo iterativo que denomina pseudo-Gauss-Newton.

Una vez determinada la curva índice de sitio se procedió a realizar el ajuste al modelo de Sullivan y Clutter con dos ecuaciones:

Ecuación 1:

$$\ln(\hat{AB}_2) = \frac{t_1}{t_2} \ln(\hat{AB}_1) + \hat{\mathbf{b}}_0 \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + \hat{\mathbf{b}}_1 \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) S$$

Ecuación 2:

$$\ln(\hat{V}_2) = \hat{\mathbf{a}}_0 + \hat{\mathbf{a}}_1 S + \hat{\mathbf{a}}_2 \frac{1}{t_2} + \hat{\mathbf{a}}_3 \ln(\hat{AB}_2)$$

Donde: S es el índice de sitio, t_1 y t_2 se refieren a dos edades diferentes, siendo $t_1 < t_2$. De igual manera AB_1 , AB_2 , V_1 y V_2 representan las áreas basales y volúmenes en las edades t_1 y t_2 . La edad t_1 es la edad de partida y, por lo tanto, AB_1 es conocida.

El ajuste se realizó utilizando el método de mínimos cuadrados en: 1) dos etapas con dos ecuaciones, 2) tres etapas, con dos ecuaciones, y 3) por regresión múltiple. Para los dos primeros se utilizó el programa SHAZAM (1988) y para la regresión múltiple, los programas 1R y 9R del paquete BMDP. Para determinar la bondad de ajuste se tomaron en cuenta los siguientes indicadores: R^2 (coeficiente de determinación), SR (suma de residuos), SA (suma de valores absolutos de los residuos), MEA (media aritmética de los errores absolutos) y r_{oe} (coeficiente de correlación lineal simple entre valores observados y estimados).

En 1997 se aplicaron a las parcelas cuatro intensidades de raleo, dejando 4, 6, 8 y 10 m²/ha. La asignación de los tratamientos no se realizó totalmente al azar sino que la elección de las parcelas para aplicar determinados tratamientos estuvo, en alguna medida, condicionada a su área basal en ese año. Para estudiar los efectos de las distintas intensidades de raleo se efectuaron análisis de la variancia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones permitieron calcular para cada parcela y año el diámetro medio (\bar{d}), la altura total media (\bar{h}), la altura dominante (h_d), la densidad en número de árboles por hectárea (N), el área basal en m²/ha (AB) y el volumen total en m³/ha (V).

* Anualmente fue necesario ajustar una función que permitiera estimar las alturas totales en función del d y h_d . Se probaron diferentes modelos, resultando seleccionados los modelos que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de las ecuaciones para estimar altura total (h en m) en función del diámetro (d en cm).

Año	Estrato	Modelo ⁽¹⁾	\hat{b}_0	\hat{b}_1	\hat{b}_2	$n^{(2)}$	R^2 ⁽³⁾
1994	1 y 2	1	-4,25468	1,9733	0,8217	538	0,49
1995	1	1	-2,88939	2,6806	0,4655	218	0,53
	2	1	-4,81347	2,1563	0,8217	307	0,51
1996	1 y 2	2	4,9352	-0,00654	0,0383	464	0,46
1997	1 y 2	1	-2,7799	2,1302	0,6055	378	0,35
1998	1 y 2	1	3,30624	5,6825	0,57677	151	0,48

⁽¹⁾ Modelo 1: $\hat{h} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \ln(d) + \hat{b}_2 h_d$; Modelo 2: $\hat{h} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 d^2 + \hat{b}_2 dh_d$; ⁽²⁾ n : número de puntos usados en los ajustes; ⁽³⁾ R^2 : coeficiente de determinación, donde dh_d representa una variable combinada formada por el producto del diámetro con la altura dominante.

Los valores de los coeficientes de determinación correspondientes a los ajustes obtenidos mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios fueron bajos, entre 0,35 y 0,51 aunque estadísticamente significativos y no pudieron ser mejorados a pesar de la exhaustiva búsqueda de variables, mediante transformaciones y productos de d , y h_d , a las que se les pudiera atribuir más variabilidad.

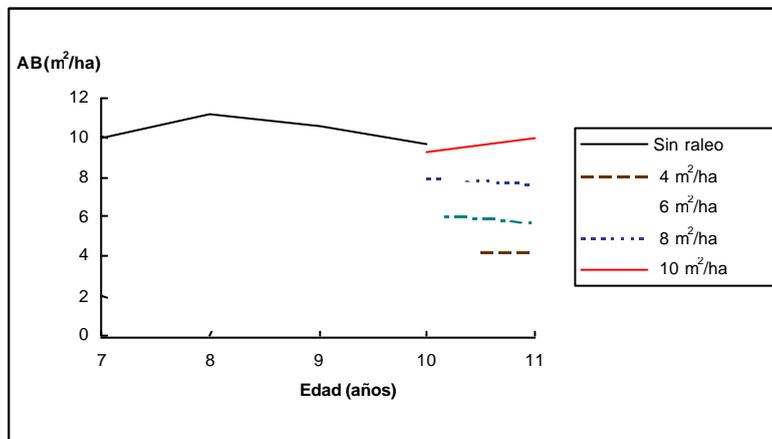
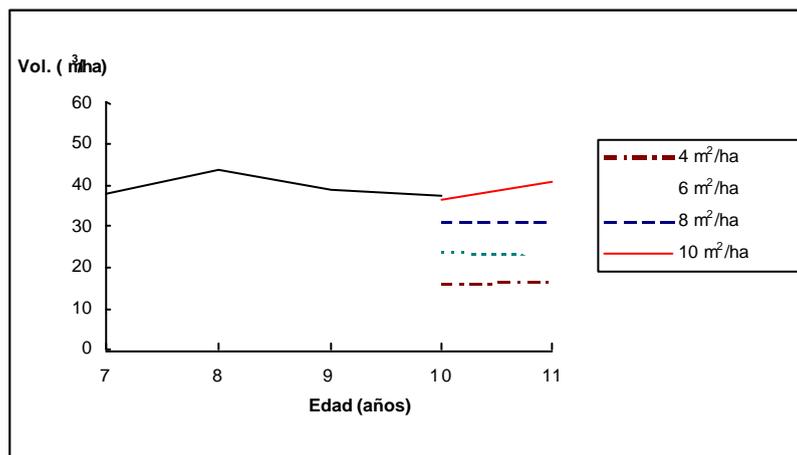
Los datos provenientes de los 158 árboles cubcados en pie, se ajustaron al modelo de Schumacher y Hall en su forma logarítmica (Pece et al., 1996), obteniéndose las siguientes estimaciones de sus parámetros que figuran en la Tabla 2.

Tabla 2. Estimadores de los parámetros del modelo de Schumacher
$$\ln(v_t) = \hat{g}_0 + \hat{g}_1 \ln(d) + \hat{g}_2 \ln(h)$$

\hat{g}_0	\hat{g}_1	\hat{g}_2	R^2
-9,76474	1,86421	0,078336	0,98

v_t en m^3 , d en cm, h en m

En las Figuras 1 y 2 se representan la evolución del área basal y el volumen con la edad. Ellas reflejan el estado de la plantación. Sus árboles estresados por la sequía y las enfermedades comenzaron a morir en cantidad tal que, en los dos últimos años de medición, la tendencia del área basal y el volumen fue de decrecimiento o en el mejor de los casos de mantenerse constante. Muchos árboles disminuyeron su altura al secarse su extremo superior.

**Figura 1.** Evolución del área basal AB media con la edad**Figura 2.** Evolución del volumen (V) medio con la edad

En esta situación, las parcelas no reaccionaron a los tratamientos de raleo. La variabilidad entre las parcelas fue tan alta que el análisis de la variancia no encontró diferencia entre los incrementos en d , h_t , N , AB y V .

Al finalizar la quinta medición y para determinar la capacidad productiva del lugar, se realizó el ajuste a la curva guía con el modelo biológico de Chapman-Richards el cual es básicamente un modelo de crecimiento de la h_d en función de la edad. Como era previsible, no fue posible encontrar un ajuste satisfactorio ni tampoco con otros modelos. Esto se debió, sin lugar a dudas, a que las alturas de los árboles, al secarse sus puntas, estaban decreciendo, en lugar de crecer.

Como esa tendencia negativa se hizo más evidente en los dos últimos años, se decidió utilizar únicamente los datos de las tres primeras mediciones. Con ellas se pudo lograr un ajuste aceptable a Chapman-Richards. Los valores de los parámetros que se obtuvieron y dos indicadores de bondad de ajuste: PR^2 (pseudo R^2) y r_{oe} (coeficiente de correlación entre observados y estimados) se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimadores de los parámetros del modelo de Chapman - Richards e indicadores de bondad de ajuste.

\hat{b}_1	\hat{b}_2	\hat{b}_3	PR^2	r_{oe}
15,2979	0,0054	0,5052	0,39	0,64

Referencias: PR^2 (pseudo R^2) y r_{oe} (coeficiente de correlación entre observados y estimados)

Una vez determinada la curva guía, se decidió diferenciar tres calidades de sitio a la edad de 132 meses (11 años), por considerarse esa edad como aproximada al posible turno de corta. Un estudio de la variabilidad de las parcelas, mostró la conveniencia de marcar tres calidades: 8, 10 y 12 m. Las curvas se muestran en la Figura 3.

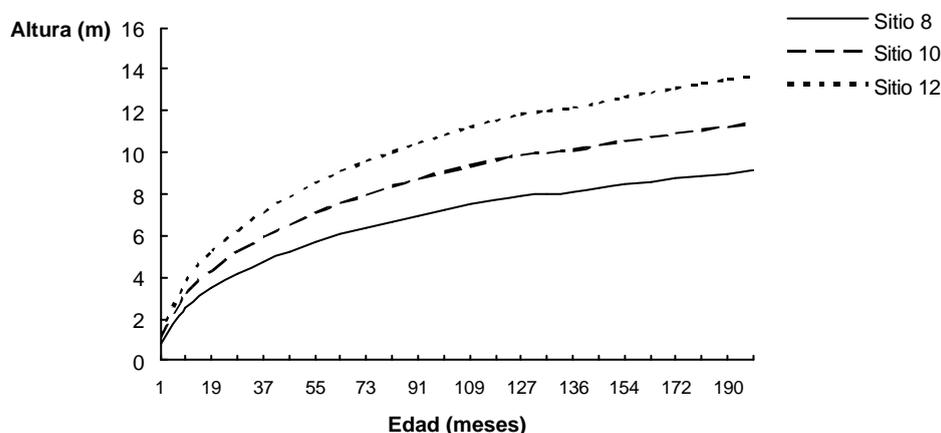


Figura 3. Curvas de índice de sitio

Después de asignar la calidad de sitio a cada parcela y por la situación de “decrecimiento” de la masa en los dos últimos años, se creyó necesario probar los ajustes a las ecuaciones de Sullivan y Clutter con: a) todos los datos ($n = 120$); b) todos los datos pero eliminando las parcelas que habían decrecido ($n = 90$); y c) con sólo las tres primeras mediciones y eliminando las parcelas que decrecieron ($n = 60$).

El ajuste por regresión múltiple no pudo realizarse porque el alto grado de correlación entre las

variables independientes ocasionaba tolerancias muy bajas y el programa 9R del BMDP no incluía algunas variables. De esto resultaba una alteración del modelo. En el método de tres etapas con los 60 datos, no se pudo realizar el ajuste por problemas de elevada correlación entre variables. Los resultados figuran en la tabla que sigue:

Tabla 4. Indicadores de bondad de ajuste de las ecuaciones obtenidas por dos y tres etapas.

n	Método		R^2	SR	SA	MEA	r_{oe}
120	2 Etapas	Ecuación 1	0,9943	-0,9957	15,379	0,1282	0,5484
		Ecuación 2	0,9867	0	3,1060	0,0259	0,9867
	3 Etapas	Ecuación 1	0,9943	-0,9953	15,379	0,1282	0,5484
		Ecuación 2	0,9861	0,06348	3,1446	0,0262	0,9863
90	2 Etapas	Ecuación 1	0,9960	-0,79519	9,1820	0,1020	0,5087
		Ecuación 2	0,9816	0	2,2648	0,0252	0,9816
	3 Etapas	Ecuación 1	0,9960	-0,7949	9,1817	0,1020	0,5087
		Ecuación 2	0,9788	0,0767	2,5039	0,0278	0,9803
60	2 Etapas	Ecuación 1	0,9990	-0,2122	3,7661	0,0628	0,7559
		Ecuación 2	0,9854	0	1,0473	0,0175	0,9854

Referencias : R^2 (coeficiente de determinación), SR (suma de residuos), SA (Suma de residuos en valor absoluto), MEA (media aritmética de los errores en valor absoluto), r_{oe} (coeficiente de correlación entre valores observados y estimados)

Los resultados que se ven en la tabla 4 indican como las más adecuadas a las ecuaciones obtenidas por dos etapas a partir de 60 datos. Los estimadores de los parámetros de las funciones seleccionadas figuran en la Tabla 5.

Tabla 5. Estimadores de los parámetros de las ecuaciones del modelo de Sullivan y Clutter seleccionada

Ecuación 1	$\hat{b}_0 = 1,4223$		$\hat{b}_1 = 0,13699$	
$\hat{\ln}(AB_2) = \frac{t_1}{t_2} \ln(AB_1) + \hat{b}_0 \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + \hat{b}_1 \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) S$				
t_1 y t_2 en meses, S en m y AB en m^2/ha				
Ecuación 2	$\hat{a}_0 = 1,2289$	$\hat{a}_1 = 0,044529$	$\hat{a}_2 = -43,993$	$\hat{a}_3 = 1,046$
$\hat{\ln}(V_2) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 S + \hat{a}_2 \frac{1}{t_2} + \hat{a}_3 \ln(AB_2)$				
t_1 y t_2 en meses, S en m, AB en m^2/ha y V en m^3/ha				

Para visualizar la bondad de ajuste de ambas ecuaciones se presentan las Figuras 4 y 5, en donde se representan los volúmenes observados y los estimados con la ecuación 2 de la Tabla 5 y las áreas basales observadas y las estimadas con la ecuación 1 de la tabla mencionada.

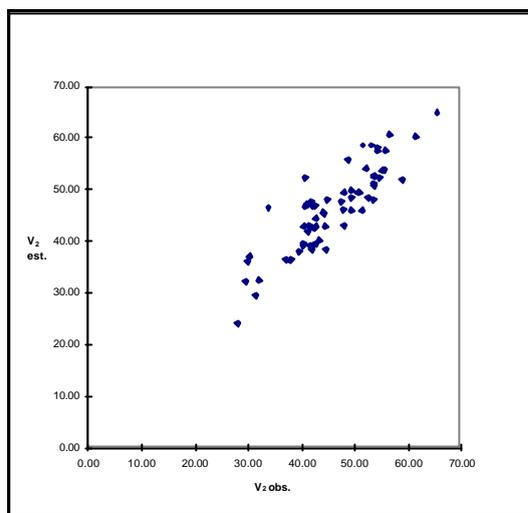


Figura 4. V_2 estimados en función de V_2 observados

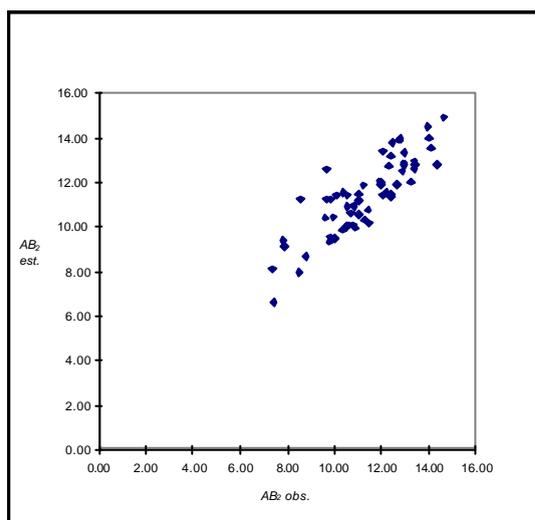


Figura 5. Área basal estimada en función del área basal observada

En base al estudio analítico de las ecuaciones se estiman los siguientes parámetros que se consideraron importantes para la predicción:

* la asíntota del área basal (A_{AB}), la que depende únicamente del sitio:

$$A_{AB} = e^{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 S}, \text{ siendo:}$$

12,41 (m^2/ha) cuando $S = 8$
16,32 (m^2/ha) cuando $S = 10$
21,46 (m^2/ha) cuando $S = 12$

* la asíntota del volumen (A_V), la que también depende del sitio:

$$A_V = e^{\hat{a}_0 + \hat{a}_1 S + \hat{a}_3 \ln(A_{AB})}, \text{ siendo: } \begin{array}{l} 67,98 \text{ (m}^3\text{/ha) cuando } S = 8 \\ 98,97 \text{ (m}^3\text{/ha) cuando } S = 10 \\ 144,10 \text{ (m}^3\text{/ha) cuando } S = 12 \end{array}$$

* la edad en la que ocurren los puntos de corte para las curvas de incrementos corriente y medio. Esta edad es conocida también como edad de madurez según el criterio de máxima producción en volumen o área basal (ya sea que se consideran las curvas de volumen o de área basal) dependen del sitio (S) y del estado inicial o punto de partida, descrito por la combinación de la edad (t_1) y el área basal (AB_1) a esa edad:

$$\text{edad de madurez (en años) según máxima producción en } AB = - \frac{t_1 (\ln(AB_1) - \hat{b}_0 - \hat{b}_1 S)}{12}$$

$$\text{edad de madurez (en años) según máxima producc. en } V = \frac{-\hat{a}_2 - \hat{a}_3 t_1 (\ln(AB_1) - \hat{b}_0 - \hat{b}_1 S)}{12}$$

En la Tabla 6, a título de ejemplo, se presentan estimaciones de la edad de madurez según el volumen y predicciones del área basal y el volumen a los 20 y 30 años de edad, partiendo de distintas situaciones iniciales de calidad de sitio y AB a los siete años de edad. Las edades de 20 y 30 se eligieron en base a que los trabajos referidos a crecimiento de paraíso en Misiones (Rey, 1976 y Volkart, 1980) se dan valores de turnos de corta de 12 y 10 años respectivamente y, en el primer trabajo publicado por sobre la plantación en estudio (Pece et al., 1996) con datos de mediciones a los siete y ocho años, se encontraron resultados similares a los que corresponden a cuatro años en Misiones. Por esta razón en el trabajo mencionado en último término se habla de resultados alentadores ya que, bajo las condiciones desfavorables del cultivo de secano en zona semiárida, se estimó que con el doble del tiempo se podía igualar la producción en Misiones a esas edades.

Tabla 6. Estimaciones con el modelo de Sullivan y Clutter del turno biológico según el volumen y predicciones del área basal y el volumen a los 20 y 30 años de edad.

Condiciones iniciales			Estimaciones						
Sitio (S_{132})	Edad t (años)	AB (m^2/ha)	Edad de madurez (años)	AB_{20} (m^2/ha)	V_{20} (m^3/ha)	cr medio ($m^3/ha/$ año)	AB_{30} (m^2/ha)	V_{30} (m^3/ha)	cr medio ($m^3/ha/$ año)
8	7	6	9	9,6	43,4	2,2	10,47	50,4	1,7
		10	5	11,5	52,3	2,6	11,8	57,1	1,9
		12	4	12,3	55,9	2,8	12,3	59,7	2,0
10	7	6	11	11,5	57,1	2,9	12,9	68,6	2,3
		10	7	13,7	68,9	3,4	14,6	77,7	2,6
		12	6	14,6	73,6	3,7	15,2	81,3	2,7
12	7	6	13	13,7	75,2	3,8	15,9	93,4	3,1
		10	9	16,4	90,7	4,5	13,0	105,8	3,5
		12	8	17,5	97,0	4,8	18,7	110,7	3,7

Los valores presentados en la Tabla 6 son válidos únicamente bajo el supuesto de que se mantengan las condiciones de los tres primeros años de medición, y que corresponden a las imperantes a los siete, ocho y nueve años de edad de la plantación, en parcelas todavía no afectadas por una situación de stress supuestamente hídrico.

La edad de madurez (máximo incremento medio en volumen) se produce muy temprano. También se observa que, a calidad constante, para mayores valores de AB , disminuye la edad a la que se presenta ese máximo. Estas dos observaciones indicarían que, por algún motivo o causa no determinada, la potencialidad del crecimiento disminuye. Una hipótesis para explicar este hecho podría ser una densidad muy alta. Tal como se mencionó, Larguía (1971) indica un máximo de 250 árboles por hectárea a partir del séptimo año, para la provincia de Misiones y propone áreas basales de 12 y 15 m²/ha para los 6 y 8 años respectivamente. A los 7 años la plantación en estudio tenía un promedio de 460 árboles por hectárea con un área basal de 10m²/ha. Se piensa que un oportuno raleo podría haber revitalizado el crecimiento.

Los resultados obtenidos con el modelo bajo las condiciones mencionadas, predicen para un turno de 30 años volúmenes finales entre 50 y 110 m³/ha con crecimientos medios entre 1.7 y 3.7 m³/ha/año. Los crecimientos estimados a los ocho años de edad fluctúan entre 2.7 y 6.7 m³/ha/año, coincidiendo el menor de ellos con el citado por Ortin (1988), para Salta.

En la Tabla 6 llama la atención el hecho que, para condiciones iniciales idénticas, los sitios de menor calidad alcanzan su madurez antes que los mejores, lo que pareciera ser contradictorio. Sin embargo, para analizar la situación que aquí se estudia es necesario recordar que la edad de madurez corresponde al máximo de la curva del incremento medio anual de manera que, este resultado aparentemente ilógico, podría deberse a que la condiciones desfavorables actúan con mayor efecto en los sitios más pobres frenando el crecimiento de la masa y de esa manera se adelanta su máximo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Bajo las condiciones de semiaridez del Parque Chaqueño Seco debe plantarse el paraíso gigante a densidades mucho menores a la de la plantación que aquí se trata y deben efectuarse los raleos que fueran necesarios. De esta manera podrían mitigarse los efectos de las sequías y evitarse el colapso de la plantación.

Si los árboles hubieran seguido la tendencia exhibida en las tres primeras mediciones (de los siete a los nueve años) por las parcelas que no estaban afectadas por heladas, sequía y/o enfermedades y, de acuerdo a estimaciones con el modelo de Chapman-Richards, se pueden obtener, al cabo de 30 años volúmenes entre 50 y 110 m³/ha.

Agradecimientos:

A los Ings.: Elvira Nuñez de Boletta, por el estudio del estado sanitario de la plantación, Estela Pan por la caracterización tecnológica de la madera, Luis Bonelli por el estudio de suelos y Pedro Boletta por proporcionar los datos de precipitaciones de Sachayoj.

REFERENCIAS

- Dixon, W. J. 1992. BMDP Statistical Software Manual. Volume 1. University of California Press. 678 p.
- Boletta, P., L. Acuña y M. Juárez de Moya. 1989. Análisis de las características climáticas de la Provincia de Santiago del Estero y comportamiento del tiempo durante la sequía de la campaña agrícola 1988/89. Editado por el convenio INTA-UNSE. Santiago del Estero. 29 p.
- Larguía, A. 1971. El paraíso gigante, esencia forestal interesante para la provincia de Misiones. Boletín de la Asociación de Plantadores Forestales de Misiones, 6:57-60.
- Ortin A., J. Sauad y C. Karlsson. 1988. Adaptación y crecimiento de paraíso gigante en distintas calidades de sitio. Actas del VI Congreso Forestal Argentino. Santiago del Estero. p 300-301.
- Pece, Marta G. 1993. Um modelo de crescimento e produção aplicado a plantações de *Eucalyptus pellita*. Tesis de maestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. Brasil. 89 p.
- Pece M., C. G. de Benítez, N. Ríos y M. J. de Galíndez. 1996. Crecimiento de una plantación de paraíso gigante (*Melia azedarach* var *gigantea*) de ocho años de edad en el departamento Alberdi en la Provincia de Santiago del Estero. Quebracho 4: 20-26.
- Rey, L. A. 1976. Análisis y cuantificación de algunas variables referidas a las reforestaciones comerciales de paraíso. Boletín de la Asociación de Plantadores Forestales de Misiones, 9:17-21.
- SHAZAM Econometrics Computer Program Ver. 6.1. 1988. User's Reference Manual. Canadá. 331 p.
- Soil Survey Staf. 1992. Keys to Soil Taxonomy. SMSS. Technical Monograph. 19. Blacksburg, Virginia.
- Sullivan A. y J. Clutter. 1972. Simultaneous growth and yield model for loblolly pine. Forest Science 18(1):76-85.
- van Laar, A. 1991. Forest Biometry. University of Stellenbosch. South Africa. 590 p.
- van Laar, A. y A. Akça. 1997. Forest Mensuration. Curvilier Verlag. Gottingen. 418 p.
- Vizcarra Sánchez, J. y J. Deschamps. 1983. Grave deterioro de la madera de paraíso (paraíso moro) en Misiones producido por *Laetiporus sulphureus* (Bull. ex Fr.) Murill. Actas del V Congreso Forestal Argentino. Tomo II. 4.108-4.111.
- Volkart Conrado, M. 1980. Plantaciones comerciales de paraíso (*Melia azedarach* L.) formas gigante y supergigante en la Provincia de Misiones, Argentina. Reunión de grupo de trabajo S1.0709 de IUFRO en Río Piedras, Puerto Rico.

