



## *PINUS TAEDA L.* DENSIDAD DE PLANTACIÓN Y RENDIMIENTO

### *PINUS TAEDA L.* PLANTATION DENSITY AND YIELD

Rubén Costas  
Patricio Mac Donagh  
Elizabeth Weber  
Pedro Irschick  
José Palavecino

**Originales**  
Recepción: 03/11/2000  
Aceptación: 28/03/2001

#### **RESUMEN**

Este artículo muestra los primeros resultados de un ensayo para testear hipótesis sobre los efectos combinados de la densidad inicial y los tratamientos de aclareos sucesivos, la altura de poda final y el número de levantes de la poda sobre el rendimiento de la masa de *Pinus taeda* L. Las variables de la masa para analizar el rendimiento fueron el volumen total por unidad de superficie, el volumen total individual, el diámetro a la altura de pecho, la altura media y la altura dominante.

Al 4° año se evaluó el efecto de la densidad sobre el rendimiento de la masa. Los tres niveles adoptados fueron: D1 = 567,13; D2 = 810,72 y D3 = 1.691,18 arb/ha. El volumen total por unidad de superficie promedio de D3 resultó superior al de D2 y, a su vez, éste superó al de D1. Los volúmenes individuales y los diámetros a la altura de pecho promedio de las densidades D1 y D2 resultaron estadísticamente homogéneos entre sí y superiores al de D3. No se encontraron diferencias significativas entre las alturas totales promedio registradas en los 3 niveles de densidad.

#### **Palabras clave**

densidad • volumen individual • volumen por unidad de superficie • diámetro a la altura de pecho • altura

#### **SUMMARY**

This paper shows the first results of a trial that has as objectives to test hypothesis about the effects of combinations of stand original density, treatments of successive thinnings, final prune height and number of raise of prune about the stand yield of *Pinus taeda* L. The yield of stands variables analyzed were volume per unity of surface, individual volume, diameter at breast height (dbh), mean height and dominant height.

At 4th year, we tested the effects of density about the stand yield, dealing with three density levels that were: D1 = 567,13; D2 = 810,72 and D3 = 1.691,18 tree/ha. The mean volume per unity of surface of the D3 results higher than D2 and this higher than D1. The means of individual volume and diameter at breast height in D1 and D2 results statistically equals and both higher than D3. About mean height and dominant height it wasn't found effects of density.

#### **Key words**

density • individual volume • volume per unity of surface • diameter at breast • height

## **INTRODUCCIÓN**

Desde la implantación de la masa forestal y durante su manejo, al silvicultor se le plantea un doble dilema productivo-económico.

- Por un lado, la maximización del rendimiento de madera, haciendo uso completo del sitio de implantación (4) mediante:
  - a. Manejo de la masa con regímenes de aclareos sucesivos, interviniendo cuando los niveles de competencia están al borde de la mortandad de los dominados.
  - b. Mantenimiento de la mayor cantidad de copa viva por individuo posible (6).
- Por el otro, la maximización del diámetro promedio de los árboles de la masa y la obtención de trozas basales libres de nudos mediante:
  - a. Manejo de la masa con densidades bajas o intermedias que optimice el espacio disponible para cada individuo, desarrollando su copa sin competencia con los otros ejemplares (3).
  - b. Podas sucesivas obteniendo, al momento de corta final, trozas basales donde las marcas o cicatrices de las ramas estén circunscriptas a un cilindro central con un diámetro máximo. El mismo, en un proceso de debobinado, no superará el diámetro de los meolos o cilindros residuales de dicho proceso, lo cual mantendrá controlado el diámetro sobre muñones (5).

A los ocho años y para un rango de densidades similar al de los evaluados en este trabajo, se cita que menores densidades de plantación inicial produjeron mayores diámetros medios a la altura de pecho (d.a.p.) y mayores volúmenes por unidad de superficie (4). Con un simulador forestal dadas la densidad, edad y calidad de sitio se ha predicho el rendimiento de masas de *P. taeda* L. desde los 4 años (2). Con los datos obtenidos al cuarto año y la densidad como única fuente de variación controlada se probaron hipótesis sobre los efectos en el rendimiento de volumen total por unidad de superficie, volumen total individual, diámetro a la altura de pecho, la altura total y la altura dominante.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Material experimental**

Masa regular de *P. taeda* L. Origen Marion, implantada en 1996 en Garuhapé-mí, dpto. Libertador Gral. San Martín (Misiones).

Coordenadas geográficas: 26° 50' 00" latitud S. y 54° 32' 30" longitud O.

Superficie total del ensayo: 19 080 m<sup>2</sup>.

Pendiente promedio del lote: 3 %.

Suelo: homogéneo, correspondiendo a Kandiodukt típico (10).

Material implantado: homogéneo respecto de la procedencia genética, sitio y tratamientos culturales.

Antes del ensayo, se subdividió la superficie en tres partes según las densidades observadas en cada una de ellas mediante un muestreo preliminar. En 1999

*Pinus taeda* L.

todos los individuos de la masa se podaron hasta una altura promedio de 1,86 m.

En función de las acciones previas realizadas sobre la masa, los antecedentes mencionados, el tamaño del lote y las restricciones estadísticas, se diseñó el siguiente ensayo:

- ✓ Se trabajó con los 3 niveles de densidad inicial, observados en el muestreo preliminar. En cada bloque con densidad inicial dada se asignaron 2 repeticiones al azar de cada una de las 12 combinaciones de los 4 niveles de altura final de poda: 3,3; 4,4; 5,5 y 6,6 m y los 3 niveles número de levantes de poda: 2, 3 y 4.
- ✓ En cada tratamiento o nivel de densidad, las dimensiones de las unidades experimentales rectangulares (UE) fueron:  
D1 = 28,0 x 9 m = 252 m<sup>2</sup>  
D2 = 21,5 x 12 m = 258 m<sup>2</sup>  
D3 = 17 x 6 m = 102 m<sup>2</sup>
- ✓ El perímetro del ensayo y cada bloque con la respectiva densidad se rodearon con líneas de bordura de la misma plantación. En ellas no se realizó ninguna medición; tuvieron la función de evitar la influencia de un nivel de densidad sobre otro.

### Modelos matemáticos

Para describir las observaciones a los 4 años se adoptaron modelos estadísticos lineales de efectos fijos (7), del siguiente tipo:

$$y_{ij} = \mu + \delta_i + \epsilon_{ij} \quad \text{ecuación 1}$$

donde:

- $y_{ij}$ : observaciones de cada variable respuesta a los cuatro años en cada unidad experimental con la  $i$ -ésima densidad y la  $j$ -ésima repetición.
- $\mu$ : media poblacional desconocida de cada variable respuesta en masas de *Pinus taeda* L. Origen Marion de 4 años, plantadas en Garuhapé-mí (Misiones).
- $\delta_i$ : efecto fijo desconocido de la  $i$ -ésima densidad de plantación sobre cada variable respuesta ( $i = 1, 2, 3$ ).
- $\epsilon_{ij}$ : error aleatorio desconocido y no observable en cada unidad experimental respecto de la esperanza matemática de cada valor de  $y_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, 12$ ).

Variables respuesta analizadas:

- a. Volumen total por unidad de superficie (m<sup>3</sup>/ha).
- b. Volumen individual promedio de cada unidad experimental (dm<sup>3</sup>).
- c. Diámetro promedio a la altura de pecho (d.a.p.) de cada unidad experimental (cm).
- d. Altura promedio de cada unidad experimental (m).
- e. Altura dominante en cada unidad experimental (m), definida por el promedio de altura de los tres individuos más altos de cada parcela.

Estos modelos lineales fueron utilizados en el análisis de los datos para testear hipótesis entre las combinaciones lineales  $\mu + \delta_i$  (9); es decir, evaluar las posibles diferencias entre las densidades de plantación sobre cada una de las variables respuesta analizadas.

### Registro y procesamiento de datos

Etapas del trabajo de campo realizado en mayo-junio del 2000:

- a. Instalación de las parcelas o unidades experimentales
- b. Medición y registro en cada árbol de los diámetros a la altura de pecho (1,3 m) y

diámetro en la base de copa con cinta diamétrica, la altura total con vara telescópica y la altura de poda con cinta métrica.

El primer procesamiento de datos se realizó con planilla de cálculo, obteniendo de cada parcela los valores medios de cada una de las variables registradas de los individuos presentes y del volumen derivado de aquellas. Se calculó el volumen individual con una función no lineal que permite predecirlo a partir del diámetro a la altura de pecho y la altura total de cada individuo:

$$V = 0,06081 * \text{d.a.p.}^{1,89376} * h^{0,92716} * \{1 - [96,363 * (\text{d.a.p.}^{-0,565})]/100\} \quad \text{ecuación 2}$$

donde:

V = volumen total sólido sin corteza (dm<sup>3</sup>/árbol)

d.a.p., expresado en cm

h = altura total del árbol, en m

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Tabla 1**

Densidad	Medias
D1	567,13
D2	810,12
D3	1691,18
General	1023,01

Una vez medido todo el ensayo se ajustó el número de árboles/ha de cada densidad, obtenido en la muestra preliminar antes de instalarlo. La tabla 1 reúne los datos de densidad media de cada nivel y la media general.

### **Análisis del efecto de la densidad sobre cada variable respuesta a los 4 años:**

#### **I. Variable respuesta: volumen individual promedio de cada parcela**

Hipótesis testeadas:

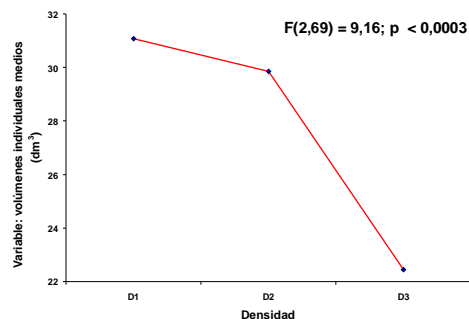
H0: las 3 densidades producen iguales volúmenes individuales.

H1: por lo menos algunas densidades producen volúmenes individuales diferentes.

**Tabla 2.**

Densidad	Medias (dm <sup>3</sup> )	S	CV
D1	31,07	10,72	0,35
D2	29,85	4,86	0,16
D3	22,45	5,69	0,25

La tabla 2 consigna medias, desviaciones estándar (S) y coeficientes de variación (CV) de los volúmenes individuales promedios de cada densidad.



**Figura 1.** Promedios de cada densidad.

A través del análisis de variancia (ANOVA) se detectaron diferencias significativas al uno por mil entre los volúmenes individuales promedio de cada densidad, lo que llevó a aceptar la hipótesis H1. Los resultados del test de Tukey para la diferencia de medias de la tabla 3 indicaron que las densidades D1 y D2 resultaron homogéneas entre sí y superiores a la densidad D3 respecto de Los volúmenes individuales promedio. Las pruebas t y de Duncan mostraron resultados similares a la prueba de Tukey. Se comprobó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de variancia de los residuos, dado que en la ecuación 1 (pág. 13) se supone que los  $\epsilon_{ij}$  se distribuyen normalmente con media cero y variancia homogénea S. Las pruebas realizadas mostraron apartamientos leves de ambos supuestos, por lo cual en un modelo de efectos fijos la prueba F es robusta (7).

**Tabla 3.**

La tabla 3 agrupa resultados del test de Tukey entre las medias de cada densidad para el volumen individual promedio. Los valores menores a 0,05 indican diferencias significativas. Grupos según Tukey con las mismas letras indican homogeneidad de medias para el volumen individual promedio.

Grupos según Tukey	Densidad	Medias (dm <sup>3</sup> )		
		D1	D2	D3
		31,07	29,85	22,45
A	D1		0,841	0,001
A	D2	0,841		0,003
B	D3	0,001	0,003	

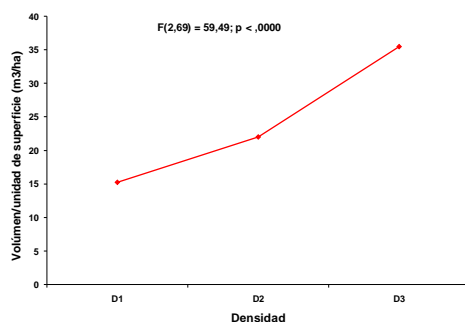
De los resultados se desprende que a los 4 años y siendo la densidad el único factor controlado, las densidades más bajas producen volúmenes individuales promedios mayores, correlacionados con los diámetros de los fustes. A esta temprana edad ya se manifestó la influencia de la densidad en las dimensiones individuales de los árboles.

**II. Variable respuesta: volumen por unidad de superficie**

Hipótesis testeadas

H0: las 3 densidades producen iguales volúmenes por unidad de superficie.

H1: por lo menos algunas de las densidades producen diferentes volúmenes por unidad de superficie.



**Figura 2.** Medias de cada densidad.

**Tabla 4**

Medias, S y CV de cada densidad

Densidad	Medias (m <sup>3</sup> /ha)	S (m <sup>3</sup> /ha)	CV
D1	15,22	5,49	0,36
D2	22,00	4,12	0,19
D3	35,48	9,04	0,25

Tabla 5.

Grupos según Tukey	Densidad	Medias (m <sup>3</sup> /ha)		
		D1	D2	D3
		15,22	22,00	35,48
C	D1		0,002	0,000
B	D2	0,002		0,000
A	D3	0,000	0,000	

Los valores menores a 0,05 muestran diferencias significativas.

Con ANOVA se detectaron diferencias significativas al uno por mil entre los volúmenes individuales promedio de cada densidad, aceptándose entonces la hipótesis H1. Con el test de Tukey sobre diferencia de medias indica que la densidad D3 produce resultados estadísticamente superiores a la D2 y ésta, a su vez, volúmenes por unidad de superficie superiores a la D1 (tabla 5).

La verificación de supuestos demostró la distribución normal de los residuos, pero no la homogeneidad de las variancias. A los efectos de homogeneizar las variancias se transformaron los valores de volúmenes por unidad de superficie de cada parcela mediante un método empírico (7). Se ajustó la función

$$\text{Log } S_i = \log \theta + \alpha \log \bar{X}_i \quad \text{ecuación 3}$$

donde:

$S_i$  = desvío estándar entre los valores de volumen por unidad de superficie observados en cada parcela del i-ésimo nivel de densidad.

$\bar{X}_i$  = media aritmética de los valores de volumen por unidad de superficie observados en cada parcela del i-ésimo nivel de densidad.

$\theta$  y  $\alpha$  = parámetros del ajuste.

Valor estimado de  $\alpha = 0,641$ . Como se supone que los  $S_i$  son proporcionales a  $\bar{X}_i^{0,641}$  se optó por la transformación raíz cuadrada ( $\alpha = 0,5$ ) de cada valor de la parcela de la ecuación 1 de la siguiente manera:

$$y^* = \sqrt{y_{ij}} \quad \text{ecuación 4}$$

Se consiguió la homogeneidad estadística de las variancias según el test de Levene obteniendo después los siguientes resultados sobre el efecto de la densidad sobre la variable transformada.

Tabla 6

Grupo según Tukey	Densidad	Medias		
		D1	D2	D3
		3,84	4,67	5,91
C	D1		0,0002	0,0001
B	D2	0,0002		0,0001
A	D3	0,0001	0,0001	

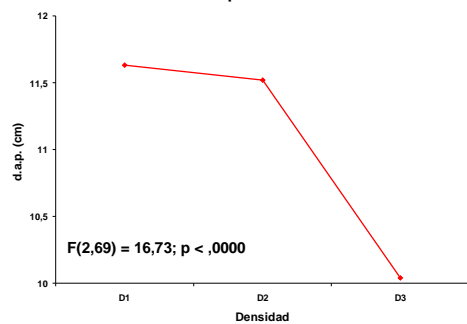
Las medias de cada densidad con  $y^*$  se señalan en tabla 6. El análisis de variancia del efecto de la densidad sobre la variable transformada mostró diferencias entre los tratamientos al uno por mil. Los resultados de la prueba de Tukey entre los pares de medias de cada tratamiento (tabla 6) son semejantes a los de la tabla 5.

De las tablas 3 y 5 se desprende que las diferencias de resultados entre las densidades extremas para la variable respuesta volumen por unidad de superficie fueron más marcadas que con respecto a la variable respuesta volumen individual promedio, lo que a priori indica una mayor influencia de la densidad sobre aquella dentro del rango de densidades a los cuatro años.

### III. Variable respuesta: diámetro a la altura de pecho (d.a.p)

Hipótesis testeadas: similares a las de los dos primeros análisis.

**Figura 3**  
Promedios de d.a.p. de cada densidad



**Tabla 7**  
Medias, desviación estándar y CV de los d.a.p. medios de cada densidad

Densidad	Medias (cm)	S (cm)	CV
D1	11,63	1,40	0,12
D2	11,52	0,72	0,06
D3	10,04	0,96	0,10

Utilizando ANOVA se encontraron diferencias significativas entre los d.a.p. medios producidos en cada densidad, lo que llevó a aceptar la hipótesis H1.

El test de Tukey de comparaciones de pares de medias (tabla 8) revela homogeneidad estadística entre los d.a.p. medios de las densidades D1 y D2, siendo ambos estadísticamente superiores al d.a.p. medio producido en la densidad D3. Los tratamientos con las mismas letras son estadísticamente homogéneos entre sí y distintos a los indicados con otras letras.

**Tabla 8.**

Grupos según Tukey	Densidad	d.a.p. medio (cm)		
		D1	D2	D3
	D1	11,63	11,52	10,04
A	D1		0,934	0,000
A	D2	0,934		0,000
B	D3	0,000	0,000	

Los valores menores a 0,05 indican diferencias significativas entre los pares de medias correspondientes.

Los resultados del test de Tukey para la variable d.a.p. son similares a los obtenidos para la variable volumen individual promedio. Las variables respuesta en las densidades D1 y D2 son estadísticamente homogéneos entre sí y superiores a los obtenidos en D3.

### IV. Variable respuesta: altura media

Hipótesis involucradas: similares a las de los dos primeros análisis.

Los resultados descriptivos de la variable respuesta altura media en cada tratamiento son mostrados en tabla 9 y figura 4 (pág. 18).

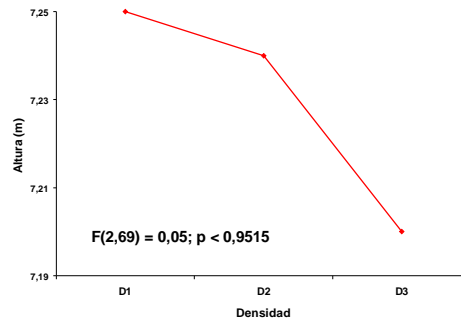
**Tabla 9**

Medias, desviación estándar y CV de la altura media de cada densidad

Densidad	Medias (m)	S (m)	CV
D1	7,25	0,70	9,71
D2	7,24	0,36	4,98
D3	7,20	0,72	10,04

**Figura 4**

Promedios de altura (m) de cada densidad.



ANOVA no registró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de densidad. Por lo tanto se acepta la hipótesis de igualdad de altura media entre los tratamientos de densidad. Como comprobación adicional, al realizarse los tests de comparaciones entre pares de medias de Tukey, Duncan y Mínima Diferencia Significativa, ninguno de ellos mostró diferencias estadísticamente significativas.

## V. Variable respuesta: altura dominante (HD)

Hipótesis involucradas: similares a las de los dos primeros análisis.

**Tabla 10**

Densidad	Medias (m)	S (m)	CV
D1	7,90	0,74	0,09
D2	8,17	0,42	0,05
D3	8,18	0,60	0,07

A la izquierda se tabulan medias, desviaciones estándares y coeficientes de variación de la variable respuesta altura dominante en cada tratamiento.

ANOVA no detectó diferencias estadísticamente significativas de HD entre los tratamientos de densidad. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de igualdad de altura dominante entre los tratamientos de densidad. La aceptación de las hipótesis nulas respectivas para esta variable y la altura media coincide con lo expresado por otros autores (8), quienes asociaron las variaciones de altura media y altura dominante con la calidad de sitio y no con la densidad.

Con respecto a las predicciones del Simulador Forestal (2), el ordenamiento de los resultados de las 4 variables bajo estudio para cada densidad son similares. Los valores absolutos de d.a.p. y de volumen por unidad de superficie obtenidos del ensayo son menores a las predicciones del simulador en promedios de 30,30 y 59,13 % respectivamente. Factores que pueden originar las diferencias son:

- Uso de distintas funciones de volumen y algoritmos.
- Distintos índices de sitio en el ensayo y la función de predicción del simulador.
- Registro -en el ensayo- de 17,81 % de individuos de reposición (árboles plantados un año después que la plantación original).



*Pinus taeda* L.

- Efecto de podas realizadas antes de los 4 años con una altura promedio en todo el ensayo de 1,86 m. En el simulador no se consideran tratamientos silvícolas.
- Material genético presente en el ensayo y en el simulador.

## **CONCLUSIONES**

Los resultados de los análisis del efecto de la densidad sobre las 4 variables bajo estudio fueron similares a los obtenidos a los 8 años (4), con la salvedad que los mismos se obtuvieron a los 4 años en el presente trabajo, es decir, con una antelación de la mitad de tiempo.

El aumento de densidad produjo mayores volúmenes por unidad de superficie, menores volúmenes individuales, menores d.a.p. promedio y ninguna incidencia estadísticamente significativa sobre la altura media y sobre la altura dominante.

Se seguirá analizando el efecto de la densidad de la plantación en años sucesivos. Como en julio-agosto del 2000 fueron aplicados los tratamientos de poda previstos en el proyecto original, a partir del 5° año se podrá evaluar el efecto de la densidad combinada con la poda sobre el rendimiento de la masa.

## **Agradecimientos**

A los alumnos de Ingeniería Forestal: Ramón Silva, Rosa A. Winck, Liliana E. Rivero, Eusebio Winck y Reinaldo Jara, por su participación ad-honorem en la toma y procesamiento de datos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Avery, T. E. & Burkhart, H. E. 1994. Forest measurements. Fourth Edition. McGraw-Hill. New York.
2. Crechi, E. H.; Fassola, H. E. y Friedl, R. A. 1998. Simulador Forestal. Manual de descripción técnica. INTA - F.C.F. UNM. Montecarlo. Misiones.
3. Daniel, T. W. et al. 1982. Principios de Silvicultura. McGraw-Hill. México.
4. Fahler, J. C. et al. 1986. Comportamiento de 10 diferentes densidades de plantación inicial en *P. taeda* a los 8 años en suelos del complejo 9 C.A.R.T.A. en Misiones. INTA. Informe Técnico N° 46.
5. Fassola, H. E. 1992. Regímenes silvícolas con producción de madera libre de nudos en *P. Elliottii* Engelm en la zona central de Corrientes. Revista Yvyrareta N° 3. F.C.F. - UNM. Eldorado. Misiones.
6. Hawley, R. C. y Smith, D. M. 1972. Silvicultura práctica. Barcelona. Omega S.A.
7. Montgomery, D. C. 1991. Design and Analysis of experiments. Wiley & Sons. New York.
8. Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F. y Real, P. 1997. Mensura Forestal. IICA-BMZ/GTZ. San José. Costa Rica.
9. Searle, S. R. 1971. Linear models. Wiley & Sons. New York.
10. Soil taxonomy. 1991. Key to soil taxonomy. Soil survey staff. AID. USDA.
11. Thrower, J. S.; Iles, K. and Di Lucca, M. 1992. Inventory/growth and yield course in Eldorado. F.C.F. UNM. Misiones. Argentina.



La Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias ha sido inscrita con el n° 3259 en el Directorio del sistema de información de publicaciones científicas seriadas de América Latina, el Caribe, España y Portugal denominado LATINDEX

Actualmente pertenecen a esta entidad, creada en 1995 por el esfuerzo mancomunado de varios Centro Regionales y Nacionales, los siguientes países:

Argentina	Brasil	Chile
Colombia	Cuba	España
México	Portugal	Venezuela

Su objetivo es difundir, hacer accesible y elevar la calidad de las revistas científicas mediante recursos compartidos. Para ello coordina acciones de acopio, procesamiento, divulgación, producción y uso de la información aparecida en revistas y monografías de los países de su zona de influencia. Son sus usuarios potenciales quienes utilizan, intercambian y generan información, estando interesados en contenidos, temas y acciones relacionados con la ciencia. En el Directorio se incluyen datos relativos al editor, las direcciones postal y electrónica de la publicación, los procedimientos para su distribución, su precio, etc. Próximamente se completará un Catálogo con títulos seleccionados y clasificados.