



Efecto del espaciamiento en la productividad y valor económico de melina clonal (*Gmelina arborea* Roxb.), Pacífico Central de Costa Rica

Nat-Yel Yasir SÁENZ-SABORÍO ¹, Olman MURILLO-GAMBOA ^{*1},
Yorleny BADILLA-VALVERDE ¹, Mario GUEVARA-BONILLA ¹, Edwin ESQUIVEL-SEGURA ¹

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

*E-mail: natsaenz.yassir@gmail.com; omurillo@itcr.ac.cr

Enviado: 20/03/2026; Aceptado: 26/06/2026; Publicado: 05/08/2026.

RESUMEN: La melina se cultiva en el país desde los años 60 y es la principal fuente de abastecimiento de madera. La especie ha sido mejorada genéticamente y se ha logrado reducir su ciclo de vida de 10 a 6 años. El objetivo fue determinar el efecto del espaciamiento de plantación sobre la productividad y el valor comercial de *Gmelina arborea*. La investigación se realizó en un ensayo clonal de melina en Orotina, en el Pacífico central de Costa Rica, donde se evaluaron plantíos de 4x3,5 m, 4x3 m y 4x2,5 m. Se analizaron el diámetro, el volumen comercial, el valor económico, la calidad del árbol y los índices de calidad. El análisis de varianza y el no paramétrico Kruskal-Wallis se realizaron mediante programación en R; este último, únicamente para las variables que no cumplieron los supuestos de la regresión. El volumen y la valoración se obtuvieron mediante el programa Avalúos Forestales. El espaciamiento 4x3,5 m fue significativamente superior en todas las variables. El incremento en volumen, en valor comercial y en productividad fue exponencial e inversamente proporcional a la densidad de plantación. Melina clonal puede crecer a 6 cm año⁻¹ DAP, 40 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y \$1438 ha⁻¹ año⁻¹ durante sus primeros 3 años, con 714 árboles ha⁻¹. A mayor tasa de crecimiento del DAP aumenta exponencialmente la proporción de madera para aserrío y el valor económico de la plantación.

Palabras clave: silvicultura clonal; manejo de plantaciones; economía forestal.

Spacing effect in productivity and economic value of clonal melina (*Gmelina arborea* Roxb.), Central Pacific of Costa Rica

ABSTRACT: Melina has been cultivated in the country since the 1960s and is the main source of wood. The species has been genetically improved, reducing its cycle from 10 to 6 years. The objective was to determine the effect of planting density on productivity and commercial value. The research was conducted in a clonal trial of melina in Orotina, Central Pacific Costa Rica, where planting at 4x3.5 m, 4x3 m, and 4x2.5 m spacings were evaluated. Diameter, commercial volume, economic value, tree quality, and quality indexes were investigated. Analysis of variance and nonparametric Kruskal-Wallis analysis were performed using R programming for variables that did not meet regression postulates. Volume and appraisal were obtained using the Avalúos Forestales Program. The 4x3.5m spacing was significantly superior in all variables. Volume increment, commercial value, and productivity exhibited an exponential pattern, inverse to planting density. Clonal melina can grow at a rate of 6 cm DBH yr⁻¹, 40 m³ ha⁻¹ yr⁻¹, and US\$1,438 ha⁻¹ yr⁻¹ during its first 3 years with 714 trees ha⁻¹. A higher DBH growth rate exponentially increases the proportion of sawwood and economic value of plantations.

Keywords: clonal forestry; plantation management; forest economy.

1. INTRODUCCIÓN

La melina (*Gmelina arborea* Roxb.) se cultiva en el país desde finales de los años 60 y es la principal fuente de suministro de madera. Es una especie originaria del sudeste asiático, cuyas primeras plantaciones se establecieron en Costa Rica en 1966, en la región caribeña (Lega, 1988), como parte de un ensayo a gran escala de procedencias asiáticas. Su introducción se orientó a la producción de fibra para la fabricación de papel. Sin embargo, la especie se consolidó como una de las principales fuentes de madera para aserrío en los programas de reforestación, debido a su buena adaptación y a su rapidez de crecimiento (ROJAS et al., 2004;

ÁVILA-ARIAS et al., 2015b; HERNÁNDEZ-CASTRO et al., 2021a; TENORIO et al., 2024). Su madera se ha convertido en los últimos años en la de mayor consumo por la industria local (Oficina Nacional Forestal - ONF, 2023), gracias a sus propiedades y múltiples usos en la industria de la mueblería, en productos de construcción, en tableros contrachapados, en lápices y, principalmente, en tarima (MOYA-ROQUE et al., 2010; ONF, 2023).

Los estudios de calidad y valor de plantaciones forestales en la región se remontan a 1993, cuando se inició el desarrollo de todo un acervo de conocimiento que ha continuado evolucionando en el sector forestal local (ROJAS;

MURILLO, 2000; MURILLO, 2000; MURILLO; BADILLA, 2004; MURILLO et al., 2004; MURILLO et al., 2011; MURILLO; BADILLA, 2015). La evaluación de la calidad de las plantaciones forestales es, por lo tanto, un aspecto esencial para determinar su valor comercial. Con mayor relevancia cuando se plantan especies latifoliadas tropicales, en las que los árboles aún presentan defectos del tronco y hábitos de ramificación derivados de la baja calidad genética (MURILLO; GUEVARA, 2013; RODRÍGUEZ et al., 2022).

Dada la importancia de la melina en la actividad forestal nacional, ha sido objeto de amplia investigación en los programas de mejoramiento genético. En los últimos 15 años se registra un aumento de más de un 30 % en productividad, calidad y valor económico en general, debido a la selección y uso de genotipos de alto rendimiento (SALAS-GUEVARA, 2012; MURILLO; GUEVARA, 2013; ÁVILA-ARIAS et al., 2015b; ÁVILA-ARIAS et al., 2015c; ESPITIA et al., 2016; VALLEJOS et al., 2016; MURILLO; BADILLA, 2015; HERNÁNDEZ-CASTRO et al., 2021a; 2021b; 2021c). Pero de igual importancia ha sido el uso de clones tolerantes a *Ceratocystis fimbriata*, hongo causal de la marchitez de la melina, que desbastó las plantaciones comerciales en los últimos 10 años en el país (SALAS-RODRIGUES et al., 2016; MÉNDEZ-ÁLVAREZ et al., 2021; MÉNDEZ-ÁLVAREZ et al., 2023). Gracias a los aportes de la mejora genética, el uso de clones certificados de melina de alto rendimiento y tolerantes al patógeno se ha vuelto cada vez más generalizado en el sector. Sin embargo, la plantación clonal conlleva un aceleramiento de las prácticas de manejo silvicultural convencional, como la aplicación temprana de podas y raleos.

El cambio en un programa silvicultural debe iniciarse con la revisión del espaciamiento inicial para lograr un mejor control del área basal y de la competencia. La densidad inicial de plantación es relevante, puesto que repercute directamente en la productividad y en la calidad del fuste, y puede mitigar la aparición de ramas gruesas y de una ramificación excesiva y, como resultado, en el valor final de la madera (TENORIO et al., 2019; TENORIO et al., 2024; MURILLO, 2000). Sin embargo, el conocimiento sobre la productividad clonal de melina bajo distintos espaciamientos (QUIRÓS, 2015; FONSECA et al., 2021; FONSECA et al., 2022) es escaso, y los pocos estudios reportados se basan en investigaciones de alta densidad para la producción de biomasa (TENORIO et al., 2018; TENORIO; MOYA-ROQUE, 2019; TENORIO et al., 2019; TENORIO et al., 2024). Por ello, esta investigación se realizó con el objetivo de determinar el

efecto de la densidad inicial sobre la productividad y el valor comercial de la melina clonal en el Pacífico de Costa Rica. Como hipótesis de estudio se propuso que la mayor densidad de plantación repercutirá en un menor crecimiento diamétrico, sin embargo, la mayor cantidad colectiva de árboles compensará en volumen y valor.

2. MATERIAL E MÉTODOS

El sitio de investigación se ubicó en Orotina, en el Pacífico Central de Costa Rica, a una altitud de 220 m s.n.m. m. En esta región, el período lluvioso puede acumular aproximadamente 2250 mm de precipitación al año, distribuida entre mayo y diciembre, con temperaturas cálidas que oscilan entre 24 y 34 °C (NASA, National Aeronautics and Space Administration, 2022). Durante el periodo seco restante se registran de una a dos lluvias al mes, que no superan los 30 mm, y se manifiesta en una caducidad de la melina superior al 80%. El sitio corresponde con la zona de vida Bosque Húmedo Tropical de Holdridge. El suelo presentó baja acidez, baja saturación por aluminio y pH superior a 5,5 (Tabla 1), con una textura arcillosa (15 % arena, 13 % limo y 72 % arcilla).

La preparación del sitio de plantación comenzó con un barrido con un tractor de oruga para remover la sucesión de bosque secundario de aproximadamente 4 años. El terreno se preparó luego con una rastra y un subsolador, en fajas de un metro de ancho y a cada cuatro metros entre fajas, en dirección perpendicular a la pendiente (10 %). Se aplicó un herbicida preemergente y, 15 días después, se procedió a plantar. El hoyado se realizó con palín y las plantas de seis semanas de edad se produjeron en ambiente protegido, en un sistema Jiffy de 36 mm de diámetro y 70 cm de alto.

El sitio se plantó en octubre del 2019 y recibió lluvia hasta finales de diciembre de ese año. Se aplicaron 50 g de cal dolomítica al fondo del hoyo y 100 g de MAP (11-52-0) mezclado con la tierra, dado que se registró ausencia total de fósforo (Tabla 1). Se incorporó a la siembra el hidroretenedor hidratado al fondo del hoyo (0,5 litros por planta), mezclado con la tierra. A los dos meses se realizó un rodaje o una limpieza manual de 1 m alrededor de cada árbol, junto con la aplicación de 100 g de sulfato de amonio (NH₄NO₃) en dos hoyos con espeque, separados entre sí en 15 cm de la planta. La hormiga cortadora se controló con insecticida repelente (Fipronil) una vez cada 1 o 2 meses durante los primeros 18 meses.

Tabla 1. Análisis químico completo del suelo al momento de la siembra del ensayo de espaciamientos de melina clonal en el 2019, Orotina, Pacífico Central de Costa Rica.

Table 1. Complete chemical soil analysis at planting of melina clonal spacing trial in 2019, Orotina, Central Pacific of Costa Rica.

Profundidad	cmol (+) L ⁻¹						%		mg L ⁻¹			
	ACIDEZ	Al	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
	0,5	0,3	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
0-20 cm	0,16	<0,16	7,46	2,28	0,50	10,40	2	ND	3,1	15	124	18
20-40 cm	0,12	<0,12	5,95	1,55	0,34	7,96	2	ND	2,9	16	106	15

El ensayo se basó en un diseño experimental de bloques completos al azar. El estudio evaluó tres espaciamientos (4 x 2,5 m; 4 x 3 m y 4 x 3,5 m), que correspondieron a densidades iniciales (N) de 1000, 833 y 714 árboles ha⁻¹, respectivamente. Se establecieron dos repeticiones por cada tratamiento, en lotes de 200 árboles cada uno, como unidad experimental.

Todo el ensayo se extendió por una superficie de 1,8 ha, en un terreno de topografía levemente ondulada a plana.

Las plantas se obtuvieron de una mezcla de 50 clones provenientes del programa de mejoramiento genético de melina de GENFORES (Cooperativa de mejoramiento genético forestal) (HERNÁNDEZ-CASTRO et al., 2021a).

El mantenimiento de la plantación siguió el protocolo establecido y mejorado para melina (MURILLO, et al., 2025). Las malezas se controlaron mecánicamente (con motoguadaña) hasta los seis meses de edad. El control químico se realizó cada tres meses durante el primer año y cada cuatro meses durante el segundo año. La poda se inició a los dos meses, con despunte de ramas laterales y, en algunos casos, con poda de formación. La segunda poda se aplicó a los seis meses, con despunte de ramas laterales y eliminación de ramas bajas inferiores a 1 m. A los 14 meses se aplicó la tercera poda con motosierra hasta una altura de 1,8 m.

Las mediciones del ensayo comenzaron en el primer año. Desde temprano se realizaron mediciones anuales al inicio de cada periodo seco para disminuir error experimental. A los 3,3 años se realizó la última medición mediante una muestra aleatoria de aproximadamente un 15 % de los árboles presentes en cada unidad experimental o parcela, con base en el método de muestreo de árboles individuales (MURILLO et al., 2011; MURILLO; BADILLA, 2015). Básicamente consistió en un inicio aleatorio y luego en una muestra sistemática de cada 7 individuos en pie. Este método de muestreo permitió recorrer toda la superficie plantada en cada una de las unidades experimentales (espaciamento x repetición), y el tamaño de muestra final fue siempre superior a 30 árboles por unidad experimental o parcela. A cada árbol incluido en la muestra se le midió el DAP (diámetro a la altura del pecho) en cm y se calificó la calidad de sus primeras cuatro trozas con base en la metodología de calidad de árboles, en una escala de 1 a 4, donde 1 es excelente para aserrío y 4 no tiene valor comercial (MURILLO; BADILLA, 2004; MURILLO; BADILLA, 2015).

Los datos de cada árbol muestreado se procesaron de forma individual para determinar su volumen comercial y su valor en pie. Para el análisis estadístico de significancia, se utilizó el promedio de los árboles de cada unidad experimental.

La mortalidad de cada parcela (unidad experimental) se estimó con base en su superficie conocida y en la relación entre el número de árboles en pie y el número de árboles originales. La información se organizó y revisó en la hoja de cálculo de Excel para su análisis posterior en el programa "Avalúos Forestales, versión 2023". El programa utilizó un factor específico de conicidad para la melina (QUIRÓS, 2015), lo que permitió estimar la reducción del diámetro en cada altura de fuste deseada. El largo de la troza se definió en 1,35 m (la primera troza considera los 10 cm de altura del tocón) y en 1,25 m para las siguientes trozas, todas en función de su uso final en la industria de la tarima. El diámetro mínimo se estableció en 12 cm con corteza en la cara menor de la troza. El precio de la madera en pie se definió en €50 por pulgada maderera tica (PMT), ajustado para el Pacífico central del país por su lejanía respecto de la industria de tarima, con base en el valor de referencia de la Oficina Nacional Forestal (ONF, 2023). Mientras que la madera gruesa (>25 cm) se tasó en €90 por pulgada maderera tica en esta región del país (ONF, 2023). Es importante mencionar que, aunque los criterios metodológicos de clasificación de la madera y de evaluación de la calidad de los árboles, así como los espaciamientos utilizados en esta investigación, sean similares entre países, las condiciones de precio, la unidad de medición y la comercialización sí pueden ser muy diferentes en cada país.

El programa realizó el despiece de cada árbol y determinó el volumen comercial de cada troza que alcanzó la medida

comercial. Durante el inventario en campo, el volumen de cada troza fue calificado en cuatro categorías de calidad para aserrío, con valores de 1 a 4, según la metodología general de calificación de la calidad de las trozas (MURILLO; BADILLA, 2004). El valor de mercado de cada troza se obtuvo con base en su volumen en pulgadas (PMT), penalizado por su categoría de calidad a saber: sin penalización para la calidad 1, un 30 % para la calidad 2 y un 50 % para la calidad 3. Las trozas de calidad 4 se consideraron sin valor de mercado (MURILLO; BADILLA, 2004; SALAS-GUEVARA, 2012; HERNÁNDEZ-CASTRO et al., 2021a). Por tanto, cada troza fue valorada con base en su clase diamétrica y su categoría de calidad. La sumatoria de trozas generó el volumen comercial de cada árbol y su respectivo valor comercial:

$$\text{Volumen comercial del árbol } i = \sum \text{Troza1} + \text{Troza2} + \dots + \text{Troza } n \quad (01)$$

$$\text{Valor comercial del árbol } i = \sum \text{Volumen } i * \sum \text{Calidad } j \quad (02)$$

donde: i = la i ésima troza con valores de 1 a n ; j = la j ésima calidad de troza con valores de 1 a 4.

Finalmente, se obtuvieron el volumen comercial y el valor de mercado de cada espaciamiento, con base en la sumatoria de los volúmenes comerciales y valores de mercado de sus árboles individuales. Una vez determinado el valor comercial de la plantación para cada espaciamiento, se determinó los índices Calidad General, Calidad de Cosecha, Calidad Máxima y Calidad de Trozas (MURILLO, 2000; ROJAS; MURILLO, 2000).

Los datos fueron analizados estadísticamente con base en el lenguaje de programación "R". Previo al análisis de varianza, se evaluó, para cada variable, el cumplimiento de la normalidad (prueba de Shapiro) y de la homocedasticidad (prueba de Bartlett de homogeneidad de varianzas). La comparación múltiple de los espaciamientos y su nivel de significancia se realizó mediante la prueba de Tukey. En aquellas variables que no cumplieron con los postulados de la regresión, se analizó mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

3. RESULTADOS

El espaciamiento inicial mostró un gran efecto en todos los índices de calidad y de productividad analizados. En general, como se observa en la Tabla 2, no se detectan diferencias significativas en la calidad general entre los tres espaciamientos.

De manera general, se observó un efecto de la densidad de plantación sobre la calidad de los árboles, donde el patrón registrado sugiere que, la calidad de los árboles aumenta con la densidad de plantación. El índice de calidad de cosecha ($N1 + N2$) y el de calidad máxima muestran claramente esta relación: a mayor densidad, mayor calidad de los árboles.

En los tres espaciamientos se obtuvo una cantidad superior a 500 individuos ha^{-1} de muy alta calidad, que supera el umbral de 300 a 400 individuos propuesto para este índice (MURILLO, 2000). En los tres espaciamientos, menos del 17 % de los árboles son de baja calidad comercial ($N3$ y $N4$).

El índice de calidad de Trozas 1 y 2 no mostró una tendencia clara respecto de la densidad de plantación. Pero sí registró más del doble de trozas de alta calidad por ha que el umbral propuesto de 1600 trozas ha^{-1} para una plantación comercial (MURILLO, 2000).

Tabla 2. Índices de calidad y crecimiento diamétrico para cada densidad inicial en el ensayo de espaciamientos de melina clonal a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Table 2. Quality and diameter growth indexes for each initial density in a spacing test in a clonal melina plantation at 3.3 years old, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

Espaciamiento (m)	Cal100	N1+N2 (%)	T1+T2 (%)	Calidad Máxima (N1)	Dap (cm) promedio	Dap (cm) Máx	Dap (cm) Mín	Homogeneidad
4 x 2,5 (N = 1000)	79,21	645 (83)	3961 (73)	399 (60%)	14,90	23,50	7,80	59,94
4 x 3 (N = 833)	81,72	610 (90)	5121 (77)	282 (113%)	15,64	22,30	8,90	60,73
4 x 3,5 (N = 714)	81,29	513 (93)	4291 (85)	142 (457%)	19,80	28,00	15,00	67,63

N1+N2 = Cantidad de individuos ha-1 de calidad 1 y 2; Amount of individuals ha-1 of quality 1 and 2; T1+T2 = Cantidad de trozas ha-1 de calidad 1 y 2; Amount of logs ha-1 of quality 1 and 2; Cal100 = Calidad expresada en una escala de 1 a 100; Quality expressed on a scale from 1 to 100.

N1+N2 = Number of individuals ha-1 of quality 1 and 2; T1+T2 = Number of logs ha-1 of quality 1 and 2; Cal100 = Quality expressed on a scale from 1 to 100.

La variación del diámetro es un indicador importante de la calidad y la homogeneidad de la plantación. Se observa un fuerte gradiente que indica un mayor diámetro promedio a menor densidad de plantación, superando en un 27 % y en un 33 % a los otros dos espaciamientos. Estos valores de diámetro promedio corresponden a un IMA (Incremento Medio Anual) de 6 cm año⁻¹ para la menor densidad, y de 4,7 cm año⁻¹ y 4,57 cm año⁻¹, respectivamente, para las otras dos densidades. El diámetro máximo muestra resultados no lineales, sin diferencias entre las dos densidades mayores, pero con un cambio abrupto en favor de la menor densidad que supera en más de un 20% a los otros dos espaciamientos.

La homogeneidad de plantación es un parámetro que mide qué tan semejantes son los árboles entre sí. Por tanto, el índice va a registrar valores más altos en aquella plantación con menor cantidad de clases diamétricas (intervalo entre el árbol de dap mayor y el menor) y con mejor distribución de árboles en cada clase. Su utilidad práctica radica en determinar la posibilidad de realizar raleos y podas sistemáticas. En la Tabla 2 se observa un gradiente evidente de mayor homogeneidad a medida que disminuye la densidad de plantación.

La Figura 1 muestra el efecto del espaciamiento sobre la calidad y las dimensiones del árbol tipo de melina.

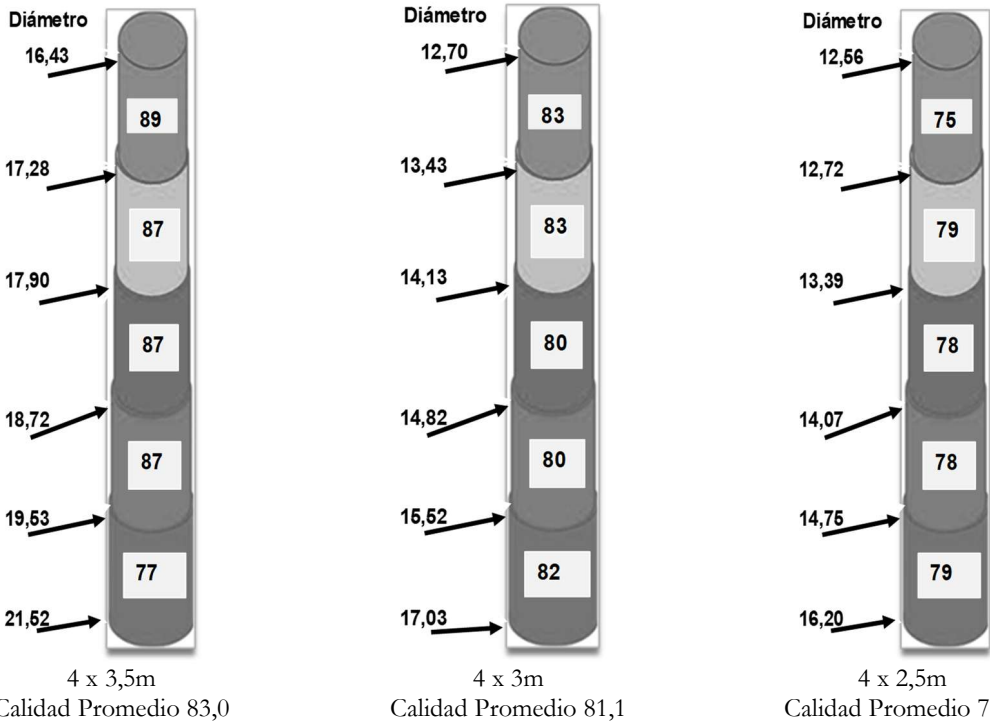


Figura 1. Composición de la calidad de las trozas en el árbol tipo para cada uno de los tres espaciamientos en una plantación clonal de melina a los 3,3 años, Orotina, Pacífico Central de Costa Rica.

Figure 1. Log quality composition in the typical tree, for each of the three spacings in a 3.3-year-old melina clonal plantation, Orotina, Central Pacific of Costa Rica.

Se observa que no existe un patrón claro del efecto de la densidad sobre la calidad del tipo de árbol. Pero si se observa un patrón claro de mayor diámetro a menor densidad de plantación.

Con respecto al volumen comercial (Tabla 3), se observa un fuerte gradiente de mayor volumen por ha y por árbol a medida que disminuye la densidad de plantación. Donde el 4x3,5 m supera en un 29 % y el 4x2,5 m en un 54 % a los

espaciamientos de 4x3 m y 4x2,5 m, respectivamente. El patrón es aún más fuerte si se compara en función del volumen comercial promedio por árbol, donde el 4x3,5 m supera en un 62 % y en un 117 % a los espaciamientos 4x3 m y 4x2,5 m, respectivamente. En términos de productividad, se observa el mismo patrón, en el que la menor densidad (N = 714, 4x3,5 m) registró un IMA de 43 m³ ha⁻¹ año⁻¹, que

supera ampliamente los de 33,6 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y 28 m³ ha⁻¹ año⁻¹ de los otros dos espaciamientos, respectivamente. Si se resta el volumen para leña, el IMA del volumen comercial aserrable es de 41,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (N = 714), 23,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (N = 833) y 20,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (N = 1000) para los tres espaciamientos investigados, respectivamente, con diferencias aún mayores.

Tabla 3. Efecto de la densidad de siembra en la producción y el valor económico de la madera: ensayo de espaciamientos de melina clonal a los 3,3 años, Orotina, Pacífico Central, Costa Rica.

Table 3. Planting density effect on production and wood commercial value in a spacing trial in a clonal 3.3-year-old melina plantation, Orotina, Central Pacific of Costa Rica.

Criterios	Espaciamientos (m)		
	4 x 2,5	4 x 3	4 x 3,5
Vol. Total Comercial Redondo (m ³ ha ⁻¹)	93	111	143
Volumen para leña (diámetro <12cm)	25,18	33,45	6
Vol. comercial redondo en troza para tarima (m ³ ha ⁻¹)	60,75	69,70	77
Vol. comercial redondo para aserri delgado (m ³ ha ⁻¹) 18cm	7,30	7,52	56
Vol. comercial redondo para aserri grueso (m ³ ha ⁻¹) > 25 cm	0,00	0,00	4
Volumen comercial promedio por árbol (m ³)	0,12	0,16	0,26
No árboles efectivos ha ⁻¹ (sin raleo)	773	679	550
No de trozas comerciales ha ⁻¹ (sin raleo)	5444	6658	5018
Valor Real en pie de leña (US \$ ha ⁻¹)	133	173	31
Valor Real en pie madera para tarima (US \$ ha ⁻¹)	1703	2006	1751
Valor Real en pie madera para aserri (US \$ ha ⁻¹)	316	295	2995
Valor Total (US \$ ha ⁻¹)	2151	2474	4777
Valor promedio por árbol (US \$)	2,78	3,64	8,68

La distribución del volumen total entre sus componentes es esencial para visualizar el valor de la plantación. En la Tabla 3 se observa un patrón de distribución del volumen total entre aserri, tarima y leña. Donde, de nuevo, a menor densidad de siembra se registra una mejor distribución del volumen en las tres categorías y una menor proporción del volumen de leña (4 %). Los otros dos espaciamientos registran un patrón inverso, con muy poco volumen comercial para aserri (6,7 % para N = 833 y 7,8 % para N = 1000) y más del 93 % restante en volumen para tarima o leña, productos de mucho menor valor comercial.

Finalmente, debe revisarse la relación entre el volumen comercial y el valor de mercado de la plantación. Se observó

un patrón similar, en el que el valor promedio de la plantación y del árbol aumenta con la menor densidad de plantación (N = 714, 4 x 3,5 m). El valor comercial promedio del árbol en la plantación de menor densidad supera en más del doble el de los otros dos árboles en promedio. El comportamiento del IMA del valor \$ha⁻¹ resultante, al sustraer el valor de la leña, corresponde entonces a \$1438 ha⁻¹ año⁻¹ para la menor densidad de plantación (4x3,5 m o N = 714). Mientras que las otras dos densidades mayores de plantación registraron un IMA de \$697 ha⁻¹ año⁻¹ y \$611 ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. En la Figura 2 se observan estos patrones de volumen y de valor comercial por ha en función de la densidad de plantación.

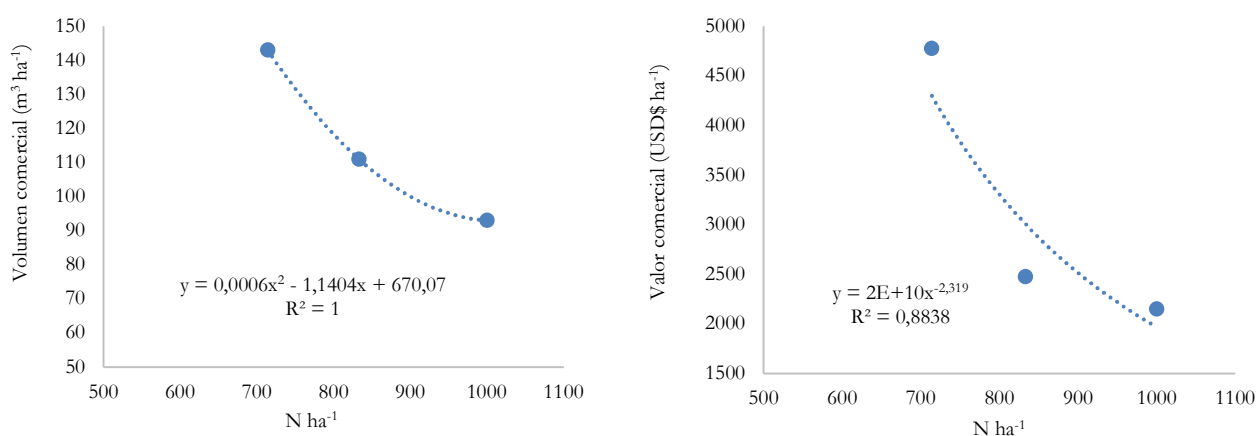


Figura 2. Efecto de la densidad de plantación en el volumen comercial (m³ ha⁻¹, Izq.) y en el valor (US\$ ha⁻¹, Der.) en el ensayo de espaciamientos de melina clonal a los 3,3 años, Orotina, Pacífico Central de Costa Rica.

Figure 2. Effect of density of plantation on commercial volume (m³ ha⁻¹, Left.) and commercial value (US\$ ha⁻¹, Right.) at 3.3 years old in a spacing trial with clonal melina Orotina, Central Pacific of Costa Rica.

Las diferencias observadas deben ser verificadas estadísticamente. El efecto del espaciamiento en casi todas las

variables de productividad y valoración es claramente visible, como se observó tanto en el análisis de varianza como en la

prueba no paramétrica. Sin embargo, el análisis de los datos indica que, con las variables volumen comercial y valor, no se observó una distribución normal ni homogeneidad de varianzas. Por lo tanto, el análisis de varianza, aunque resultó significativo, debe interpretarse con cautela en estas dos variables. La significancia del efecto del espaciamiento se verificó mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Mientras que para la variable calidad del árbol sí hubo distribución normal y un leve efecto sobre la heterogeneidad de varianzas.

En la Tabla 4 se registra los resultados, tanto del análisis de varianza para las variables volumen comercial, valor comercial y calidad del árbol, como los de la prueba no

paramétrica Kruskal-Wallis, con diferencias altamente significativas en las tres variables evaluadas. En ambos análisis de significancia, las pruebas determinaron diferencias altamente significativas entre el efecto de los tres espaciamientos evaluados en las variables investigadas.

La Figura 3 muestra el resultado de la regresión entre el DAP con el volumen comercial y con el valor de la plantación. Se observa una fuerte asociación entre el DAP y ambas variables, independientemente de la densidad de la plantación. El ajuste de los datos en ambos modelos logró explicar más del 90 % de la variación observada.

Tabla 4. Análisis de varianza y prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis del efecto de tres espaciamientos en el volumen comercial, el valor comercial y la calidad de la plantación clonal de melina a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central, Costa Rica.

Table 4. Variance analyses and non-parametric Kruskal-Wallis test for the effect of three spacings in commercial volume, commercial value and plantation quality in a 3.3-year-old melina clonal trial, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

Variable	Valor de F Espaciamientos	Probabilidad P >	Valor de F Repeticiones	Probabilidad P >	Kruskal-Wallis Espaciamientos
Volumen Comercial	82,830	< 2e-16	10,65	0,00115***	59,878 ***
Valor Com.	82,836	<2e-16	4,964	0,0262**	60,634 ***
Calidad	5,151	0,006**	31,537	0,00603 **	26,137***

Para el volumen y el valor comerciales, la significancia debe interpretarse con base en la prueba de Kruskal-Wallis.

For commercial volume and value, significance should be interpreted based on the Kruskal-Wallis test.

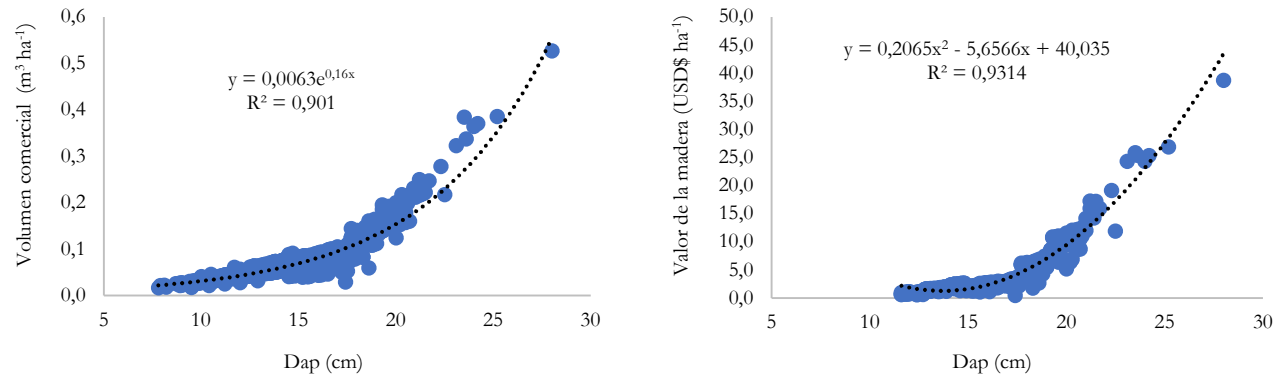


Figura 3. Relación entre el DAP y el volumen comercial (izq.) y el DAP y el valor de la madera (der.). en el ensayo clonal de espaciamientos de melina de 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Figure 3. Relationship between DBH and commercial volume (left) and DBH and commercial value (right) in a clonal trial of spacings with melina at 3.3 years old, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

4. DISCUSION

Los efectos ambientales influyen, por lo general, de manera significativa en la experimentación forestal. El ensayo sufrió daños en su primer año, causados por el viento, el ataque de hormigas y el daño por bejuco, lo que provocó una mortalidad superior a la esperada (alrededor del 20 %). Sin embargo, su efecto no fue significativo debido a que cada Unidad Experimental (Tratamiento x Repetición) consistió en 202 árboles (observaciones) y a que la tasa de mortalidad se registró de manera aleatoria y similar en toda el área de investigación.

4.1. Efecto en la calidad de los árboles y de la plantación

En general, se observó un patrón de mayor calidad de los árboles con mayor densidad de plantación, lo cual se explica principalmente por la mayor competencia. La melina es una especie de crecimiento muy rápido, con alta demanda de luz. En espaciamientos muy reducidos tiende a crecer más en altura que en diámetro, lo que produce árboles más esbeltos con una mejor proporción altura/diámetro (TENORIO et al., 2018;2019).

En contraste, a mayor densidad de plantación, se espera que disminuya la tasa de crecimiento diamétrico, como se observó en este estudio.

Los datos de la investigación sugieren que, a mayor densidad de plantación y sin un raleo oportuno, los árboles de melina, a partir de cierta edad, tenderán a competir con mayor fuerza por recursos de luz, agua y nutrientes. La melina es una especie de muy alto vigor de crecimiento y demandante de luz, por lo que es común observar que el fuste tiende a inclinarse o torcerse cuando la densidad o la competencia es muy alta. Árboles que inician con una excelente calidad de fuste en sus primeros dos años pueden ver disminuida su calidad a medida que aumenta la competencia y no se intervienen con podas y un raleo oportuno (QUIRÓS, 2015; TENORIO et al., 2018; HERNÁNDEZ-CASTRO et al., 2021b).

La homogeneidad de la plantación es un parámetro de calidad poco conocido en la silvicultura tropical. Su principio se basa en la heterogeneidad de la plantación, ya que esta influirá en costos de manejo más altos y en una menor productividad. Utiliza como principio de cálculo la cantidad

de categorías diamétricas involucradas y la frecuencia de árboles en cada una de ellas. El patrón es evidente de una mayor homogeneidad a medida que la densidad de la plantación disminuye. En una plantación con alta densidad y sin realizar raleos, se espera una alta competencia por los recursos, lo que se reflejará en una mayor dispersión de los diámetros. El crecimiento del diámetro es la variable más sensible a la competencia en plantación (ÁVILA-ARIAS et al., 2015b; TENORIO et al., 2018; TENORIO; MOYA, 2019; FONSECA et al., 2021). Esto puede corroborarse en la misma Tabla 1, al observar el intervalo de dispersión diamétrica de cada espaciamiento. Donde la heterogeneidad diamétrica aumenta a medida que crece la densidad, lo cual explica el índice de homogeneidad observado. En la Figura 1 se observa de nuevo este mismo patrón, donde el diámetro medio aumenta conforme disminuye la densidad de plantación.

4.2. Efecto en el crecimiento y composición del volumen

En la Tabla 3 y en la Figura 2 se muestran claramente los patrones de mayor crecimiento del volumen comercial, asociados a la menor densidad de plantación, a pesar de la menor cantidad de árboles presentes. Estos resultados contrastan con la hipótesis inicial del estudio, que propuso un mayor volumen comercial con una mayor densidad de árboles, debido al efecto de la suma de los volúmenes individuales de una mayor cantidad de árboles, tal y como se espera (TENORIO; MOYA, 2019; TENORIO et al., 2019; TENORIO et al., 2024). Sin embargo, melina exhibió un gran vigor en crecimiento diamétrico a menor densidad de plantación, con una tasa de incremento no lineal y superior a lo esperado. Las diferencias en el crecimiento diamétrico del 27 % y del 33 % respecto de los otros dos espaciamientos reflejan este patrón de respuesta. Asimismo, estos resultados reflejan que la melina puede perder muy rápidamente su vigor en incremento diamétrico ante una alta densidad o competencia, lo cual ocurrió a los 3,3 años si no se efectúa un primer raleo. Es un claro indicador de la pérdida de crecimiento observada en los dos espaciamientos de mayor densidad a tan temprana edad, en los que el IMA desciende de 6 cm año⁻¹ a alrededor de 4,7 cm año⁻¹.

La variación en el crecimiento volumétrico es aún mayor, donde el espaciamiento (4x3,5 m) registra un IMA del volumen comercial de madera sólida, sin considerar la leña, que supera los 40 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a los 3,3 años. Este valor es sumamente alto para plantaciones de melina en el Pacífico Central del país, donde se tiene un crecimiento efectivo de entre 8 y 9 meses al año (QUIRÓS, 2015; MURILLO; BADILLA, 2015; MURILLO et al., 2016; FONSECA et al., 2021; FONSECA et al., 2022).

La menor densidad de plantación aumentó considerablemente la presencia de volumen en las categorías de mayor diámetro y mayor posibilidad de aserrío, y disminuyó el volumen de leña. El resultado es esperado y se explica por un mayor crecimiento del diámetro en la base, que se proyecta hacia la parte alta del fuste. Con lo cual, el árbol medio de 4x3,5 m registró más del doble del volumen comercial que los otros dos espaciamientos. Este patrón se observa claramente en la Figura 2, donde se aprecian diferencias significativas en el volumen comercial entre los tratamientos, que siguen una función exponencial. Estos resultados contrastan con la hipótesis de los estudios de biomasa, en favor de una mayor densidad de plantación, tal como se ha reportado en varias especies en Costa Rica y en

el eucalipto (STAPE et al., 2022; TENORIO et al., 2024). La respuesta al incremento de diámetro y volumen superó significativamente todas las expectativas, compensando la menor cantidad de árboles y la menor densidad (714 versus 833 y 1000 individuos en los otros dos espaciamientos), en una proporción del 53% y del 29% en volumen comercial, respectivamente.

El principal factor limitante del suelo fue la ausencia de fósforo (Tabla 1). Lo que motivó la solicitud al establecimiento del ensayo de 100 g por árbol del fertilizante MAP® (11-52-0). Un mejor seguimiento del comportamiento residual del fósforo y, en general, de la CICE pudo haber contribuido a una mayor tasa de incremento anual del volumen comercial.

La selección de los mejores clones podrá tener beneficios a futuro. Dado que este ensayo involucró una amplia colección de 50 clones del programa de mejoramiento genético de melina. Los resultados observados en crecimiento y rendimiento podrán mejorarse significativamente si se plantan entre cinco y diez genotipos con mayor adaptación a esta región del país.

La densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos ha⁻¹. Dado el extraordinario vigor de los clones mejorados genéticamente y la tasa de crecimiento observada. Una densidad inicial muy alta obligaría a intervenir mediante raleos a edades muy tempranas. Un raleo antes de los 3 años tendría un valor comercial muy bajo y una proporción muy alta de biomasa de poco o ningún valor de mercado, como la leña. Estos resultados sugieren continuar investigando con espaciamientos y distribuciones espaciales de menor densidad, como 4 x 4 m (N = 625), 5 x 3 m (N = 667), o sistemas en distribución en tresbolillo (STAPE et al. 2022). Con esto se buscaría optimizar producción, reducir costos y aumentar el valor comercial.

El espaciamiento tiene un efecto significativo en la relación diámetro/altura, en la conicidad y en el volumen. A mayor densidad de plantación, se espera una mayor cilindridad, mayor altura de fuste y un mayor volumen comercial, tal y como se ha registrado en melina (Lega, 1988; Quirós, 2015) y en la mayoría de las especies forestales (Espinosa y MUÑOZ, 2017; STAPE et al., 2022). Estas relaciones alométricas pudieron influir en los resultados; sin embargo, en esta investigación no fue posible incluir este tipo de análisis. La discusión debe centrarse en cómo alcanzar el mayor volumen comercial por árbol: ¿con la promoción de una mayor altura comercial o de un mayor diámetro? Pero también: ¿cómo alcanzar el mayor volumen comercial colectivo por superficie?

4.3. Efecto en el valor de la plantación

La densidad de plantación influyó de manera significativa en el valor comercial. El comportamiento observado siguió exactamente el mismo patrón analizado para el volumen comercial, como se observa en la Tabla 3 y en la Figura 2. Sin embargo, la pendiente de la curva del comportamiento del valor ha⁻¹ es aún más pronunciada que la del volumen comercial ha⁻¹. La explicación radica en que el valor de la plantación es el resultado de la conjunción del volumen comercial y de la calidad de los árboles (MURILLO et al., 2004). El valor promedio del árbol y el valor por ha a menor densidad de plantación superaron en dos a tres veces los de los otros dos espaciamientos (Tabla 3). Se explica por un registro que indica que para tarima o leña de menor valor

comercial. Es notable observar que una diferencia en el diámetro promedio de tan solo 4 a 5 cm (26 a 33 %) repercutió en una diferencia del valor del árbol de 138 a 212 %, respectivamente.

El incremento medio anual del valor de la plantación es uno parámetro muy informativo. La tasa del IMA del valor con el mejor espaciamiento fue de casi \$1500 ha⁻¹ año⁻¹, lo que puede considerarse alto y económicamente relevante para un pequeño productor. Esta tasa de crecimiento se aproxima a la registrada en melina en las regiones del Pacífico Sur y del Caribe, donde se observa una mayor pluviosidad y se cuenta con un mayor número de meses efectivos al año (ÁVILA-ARIAS et al., 2015a; 2015b; QUIRÓS, 2015; HERNÁNDEZ-CASTRO et al., 2021a). En un escenario de buenas prácticas silviculturales corresponde realizar un primer raleo aproximadamente a los 30-36 meses, con el propósito de reducir la competencia y estimular el crecimiento de los árboles remanentes. De esta manera, se podría esperar que los árboles de mejor calidad y crecimiento, que continúen en pie después del raleo, mejoren el IMA y lo mantengan hasta el año cinco o seis (en la cosecha).

Finalmente, futuras investigaciones podrían incluir un análisis de sensibilidad económica, basado en escenarios de precio, inflación anual o tasa de cambio del dólar. Así como escenarios de plantación con y sin raleo, para una cosecha temprana orientada a suplir el mercado de madera para tarima.

5. CONCLUSIONES

El espaciamiento 4x3,5 m fue significativamente mejor para producir madera con melina clonal en el Pacífico central del país. La densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos ha⁻¹.

Las plantaciones de melina con clones deben considerar realizar un raleo a los 36 meses para evitar pérdidas de crecimiento.

La melina en el Pacífico central del país puede crecer a una tasa de DAP de 6 cm año⁻¹, 40 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y un valor de \$1438 ha⁻¹ año⁻¹ durante sus primeros 3 años de vida, si se planta a una densidad de 4x3,5 m.

A mayor tasa de crecimiento del DAP se produce un aumento exponencial en la proporción de madera para aserrío y en el valor total de la plantación.

El estudio tuvo como principal limitación estadística el análisis basado únicamente en dos réplicas por espaciamiento.

El precio de la madera de melina en Costa Rica, la unidad de medida en pulgadas y el sistema de medición y comercialización utilizado podrían afectar la aplicabilidad de esta investigación en otros países.

6. REFERENCIAS

ÁVILA-ARIAS, C.; MURILLO-CRUZ, R.; MURILLO-GAMBOA, O. Selección de clones superiores de dos conjuntos genéticos de *Gmelina arborea* en el Pacífico sur de Costa Rica. **Revista de Ciencias Ambientales**, v. 49, no. 1, p. 17-35, 2015a. <https://doi.org/10.15359/rca.49-1.2>

ÁVILA-ARIAS, C.; MURILLO-CRUZ, R.; MURILLO-GAMBOA, O.; SANDOVAL-SANDOVAL, C. Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en dos sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 12, n. 28, p. 23-35, 2015b. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v12i28.2097>

ÁVILA-ARIAS, C.; MURILLO-CRUZ, R.; MURILLO-GAMBOA, O.; SANDOVAL-SANDOVAL, C. Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 12, no. 29, p. 2-14, 2015c. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v12i29.2250>

ESPINOSA, M.; MUÑOZ, F. Raleo en bosques plantados. In: ESPINOSA, M.; ACUÑA, J. G.; RODRÍGUEZ, R.; RUBILAR, R. (Eds). **Silvicultura de bosques plantados con fines productivos**. Chile: Universidad de Concepción; 2017 p. 179-216.

ESPITTA, M.; MURILLO, O.; CASTILLO, C. Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba, (Colombia). **Árvore**, v. 40, n. 1, p. 71-80, 2016. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000100008>

FONSECA-GONZÁLEZ, W.; MURILLO-CRUZ, R.; ÁVILA-ARIAS, C.; BENAVIDEZ-FALLAS, R.; ARCE-LEDEZMA, V.; CARMONA-SOLÍS, R.; ULLOA-SABORÍO, G.; SALAZAR-RUIZ, A. G.; CARVAJAL-ARROYO, D. Predicción de biomasa en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. f y *G. arborea* Roxb. en Costa Rica. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 19, n. 44, p. 66-74, 2022. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i44.6104>

FONSECA-GONZÁLEZ, W.; MURILLO-CRUZ, R.; ÁVILA-ARIAS, C.; ROJAS-VARGAS, M.; ESPÍNOLA PARALLADA, R. M. Modelos de biomasa y de carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. **Revista de Ciencias Ambientales**, v. 55 n. 1, p. 143-159, 2021. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.7>

HERNÁNDEZ, W.; BADILLA, Y.; ESQUIVEL, E.; MURILLO, O. Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelo ácidos. **Revista de Ciencias Ambientales**, v. 55, n. 2, p. 212-232, 2021a. <http://doi.org/10.15359/rca.55-2.11>

HERNÁNDEZ-CASTRO, W.; BADILLA-VALVERDE, Y.; MURILLO-GAMBOA, O. Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (Melina) en el Caribe de Costa Rica. **Uniciencia**, v. 35, n. 1, p. 352-366, 2021b. <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.22>

HERNÁNDEZ-CASTRO, W.; MURILLO-GAMBOA, O.; BADILLA-VALVERDE, Y. Selección temprana en ensayos clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica. **Agronomía Mesoamericana**, v. 32, n. 1, p. 93-106, 2021c. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.42069>

LEGA, F. F. **Estudio de la forma de *Gmelina arborea* (Roxb.): análisis de las plantaciones de Manila, Siquirres**. 146p. Tesis [Maestría en Ciencias Agrícolas y Naturales]. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1988.

MÉNDEZ-ÁLVAREZ, D.; BADILLA-VALVERDE, Y.; MURILLO-GAMBOA, O.; ALFENAS, R. F. Genetic resistance to *Ceratocystis fimbriata* in elite genotypes of *Gmelina arborea*. **Agronomía Mesoamericana**, v. 34, n. 3, e52968, 2023. <https://doi.org/10.15517/am.2023.52968>

MÉNDEZ-ÁLVAREZ, D.; MURILLO-GAMBOA, O.; BADILLA-VALVERDE, Y.; HERNÁNDEZ-CASTO, W. Genetic tolerance to *Ceratocystis* wilt in melina (*Gmelina arborea* Roxb.). **Silvae Genética**, v. 70, p. 195-204, 2021. <https://doi.org/10.2478/sg-2021-0017>

MOYA-ROQUE, R.; MUÑOZ-ACOSTA, F.; SALAS-GARITA, C.; BERROCAL-JIMÉNEZ, A.;

- LEANDRO-ZÚÑIGA, L.; ESQUIVEL-SEGURA, E. Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 7, n. 1, p. 18-19, 2010.
- MURILLO, O. Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, v. 24, n. 2, p. 41-48, 2000.
- MURILLO, O.; MEZA, A.; CABRERA, J. M. Estimación del valor real y del valor de mercado en pie de la plantación forestal. **Revista Agronomía Costarricense**, v. 28, n. 1, p. 47-55, 2004.
- MURILLO, O.; VALLEJOS, J.; BADILLA, Y.; GUZMÁN, N.; LUJÁN, R.; GONZÁLEZ, E. Crescimento efetivo mensal inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) em Costa Rica. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 87-90, 2016. <https://doi.org/10.31413/nativa.v4i2.3406>
- MURILLO, O.; BADILLA, Y. **Calidad y valoración de plantaciones forestales**. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2004. 51p.
- MURILLO, O.; BADILLA, Y. **Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago por servicios ambientales para medir la biomasa y desarrollar proyectos de comercialización de créditos de carbono**. Cartago: Fondo de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), 2015. 108p.
- MURILLO, O.; BADILLA, Y.; MORALES, M. **Método de inventario para plantaciones pequeñas**. V Congreso Forestal Latinoamericano, Lima, Perú. 2011.
- MURILLO, O.; GUEVARA, M.; BADILLA, Y.; ESQUIVEL, E. **Manual de Cultivo de la melina en ciclo corto**. Cartago: Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2025. 56p.
- MURILLO, O.; GUEVARA, V. **Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica**. FAO, 2013. 143p.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, Version 2. 2022**. Disponible en: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
- OFICINA NACIONAL FORESTAL. **Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2023 y tendencias de las principales especies comercializadas**. Disponible em: <https://onfcr.org/wp-content/uploads/Precios-de-la-madera-en-Costa-Rica-y-tendencias-de-las-principales-especies-comercializadas-2023-10-07-2023.pdf>.
- QUIRÓS, S. **Modelos de volumen comercial, perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. en Costa Rica**. 61p. Trabajo final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2015.
- RODRÍGUEZ-PÉREZ, D.; MOYA, R.; MURILLO, O. Effect of stem height in variation of bark, heartwood, sapwood and physical properties of wood in *Dipteryx panamensis* Pittier in a provenance/progeny test. **Ciencias Florestais**, v. 32, n. 1, p. 141-162, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509843606>
- ROJAS-RODRÍGUEZ, F.; ARIAS-AGUILAR, D.; MOYA-ROQUE, R.; MEZA-MONTOYA, A.; MURILLO-GAMBOA, O.; ARGUEDAS-GAMBOA, M. **Manual para productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica**. Cartago: Fondo de Financiamiento Forestal, 2004. 314p.
- ROJAS-RODRÍGUEZ, F.; MURILLO-GAMBOA, O. Establecimiento de plantaciones de melina. In: ROJAS-RODRÍGUEZ, F.; ARIAS-AGUILAR, D.; MOYA-ROQUE, R.; MEZA-MONTOYA, A.; MURILLO-GAMBOA, O.; ARGUEDAS-GAMBOA, M. **Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica**. Cartago: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, 2004. p. 26-44.
- ROJAS, O.; MURILLO, O. Calidad de las plantaciones de teca en la Península de Nicoya, Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, v. 24, n. 2, p. 65-76, 2000.
- SALAS-GUEVARA, R. **Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón**. Proyecto de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica., 2012. 43p. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2949/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- SALAS-RODRÍGUEZ, A.; MURILLO-GAMBOA, O.; MURILLO-CRUZ, R.; ÁVILA-ARIAS, C. Evidencia de tolerancia genética a la pudrición del tronco en clones de *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 13, n. 32, p. 30-39, 2016. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v0i0.2550>
- STAPE, J. L.; SILVA, C. R.; BINKLEY, D. Spacing and geometric layout effects on the productivity of clonal *Eucalyptus* plantations. **Trees, Forest and People**, v. 8, e100235, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100235>
- TENORIO, C.; MOYA, R. Propiedades de la biomasa de plantaciones de corta rotación de dos clones de *Gmelina arborea* Roxb en tres espaciamientos. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 16, n. 39, p. 23-32, 2019. <http://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v16i39.4409>
- TENORIO, C.; MOYA, R.; ARIAS-AGUILAR, D. Evaluation of changes in tree morphology parameters, biomass yield, chemical and energy properties at three spacings of short rotation energy plantations of *Gmelina arborea* in Costa Rica from one to two years of age. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, p. 1163-1179, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100235>
- TENORIO, C.; MOYA, R.; MURILLO, O.; LORÍA, J. Energy production and its characteristics from four tropical tree species planted in short rotation woody systems in Costa Rica. **BioResources**, v. 19, n. 1, p. 695-715, 2024. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.695-715>
- TENORIO, C.; MOYA, R.; VALVERDE, J. C.; ARIAS-AGUILAR, D. Biomass production and characteristics of short rotation plantations of clones of *Gmelina arborea* in three spacings. **Silvae Genética**, v. 68, p. 92-100, 2019. <https://doi.org/10.2478/sg-2019-0017>

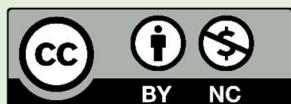
Agradecimientos: Esta investigación contó con el apoyo parcial de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica, mediante el proyecto “Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina”. El aporte de material clonal élite de melina de GENFORES (Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal) fue determinante para los resultados de la investigación.

Contribuciones de los autores: N.S.S.: metodología, toma de datos, escritura del artículo original; O.M.G.: conceptualización, metodología, toma de datos, escritura del artículo original; administración y supervisión, escritura del artículo original; Y.B.V.: conceptualización, metodología, toma de datos, escritura del artículo original; así como la escritura y edición del artículo final; M.G.B.: metodología, toma de datos, escritura del artículo original; E.E.S.: metodología, toma de datos, escritura del artículo original. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica, el aporte de material clonal élite de melina de GENFORES (Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal).

Disponibilidad de datos: Los datos de esta investigación pueden obtenerse por correo electrónico previa solicitud al autor correspondiente.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).