

Artículo original

Variación genética de los rasgos de crecimiento y las características de la madera en razas locales de *Gmelina arborea* Roxb. en el alto Magdalena, Colombia

Genetic variation of growth traits and wood characteristics among landraces of *Gmelina arborea* Roxb. in the upper Magdalena, Colombia

✉ Ana Milena López-Aguirre^{1,*}, ✉ Alonso Barrios-Trilleras²

¹ Doctorado en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ingeniería Forestal; Grupo de investigación “Madera & Bosques”, Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima, Colombia

² Grupo de investigación Madera & Bosques, Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima, Colombia

Resumen

La selección de material genético superior a partir de los valores genéticos de los rasgos de interés económico es de importancia para la industria forestal, ya que así se promueve la maximización del potencial productivo de los bosques plantados. *Gmelina arborea* se ha adaptado a las condiciones ambientales del trópico americano y ha dado lugar a razas locales promisorias para los programas de reforestación comercial encaminados a la producción de madera aserrable. El objetivo del presente estudio fue evaluar mediante parámetros genéticos el desarrollo y adaptación de 16 razas locales de *G. arborea* en un ensayo de procedencias de nueve años establecido en condiciones de bosque seco tropical en el alto Magdalena, Colombia. Se evaluaron la sobrevivencia, los rasgos de crecimiento (diámetro, altura total y volumen) y las características de la madera (densidad verde, densidad básica y módulo de elasticidad dinámico). Se estimaron la heredabilidad en sentido amplio, las ganancias y las correlaciones genéticas de los rasgos de crecimiento y las características de la madera. Los rasgos con mayor heredabilidad media fueron el volumen individual ($H^2_p = 0,1158$) y el acumulado ($H^2_p = 0,1095$). La ganancia genética en volumen acumulado de las mejores dos razas locales comparada con la media del lote de control (raza 14) sería de 3,8 % para la raza 10 y de 3,5 % para la raza 11, ambas procedentes del departamento de Atlántico. El estudio reporta correlaciones genéticas negativas entre la densidad básica de la madera y los rasgos de crecimiento, especialmente el diámetro ($r_g = -0,694$) y el volumen individual ($r_g = -0,637$). Las razas locales con productividad superior encontradas en el estudio permitirían la ampliación de la base genética y el establecimiento de nuevas plantaciones de alto rendimiento en la región.

Palabras clave: Heredabilidad; Ganancia genética; Correlación genética; Mejoramiento genético forestal.

Abstract

The selection of superior genetic material based on the genetic values of traits of economic interest is of importance in the forest industry to maximize the productive potential of planted forests. *Gmelina arborea* has adapted to the environmental conditions of the American tropics, giving rise to promising landraces for commercial reforestation programs to produce sawn timber. Our objective here was to evaluate through genetic parameters the development and adaptation of 16 landraces of *G. arborea* in a nine-year provenance trial in tropical dry forest conditions in upper Magdalena, Colombia. The trial evaluated the survival, the growth traits (diameter, total height, and volume), and the wood characteristics (green and basic density and dynamic elasticity modulus). Broad-sense heritability, genetic gains, and genetic correlations were estimated for the growth traits and wood characteristics. The traits with the highest mean heritability were the individual ($H^2_p = 0.1158$) and cumulative volumes ($H^2_p = 0.1095$). Genetic gains in the cumulative volume of the best two landraces compared

Citación: López-Aguirre AM, Barrios-Trilleras A. Variación genética de los rasgos de crecimiento y las características de la madera en razas locales de *Gmelina arborea* Roxb. en el alto Magdalena, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(184)641-653, junio-septiembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1878>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
Ana Milena López-Aguirre;
amlopeza@ut.edu.co

Recibido: 27 de febrero de 2023

Aceptado: 14 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 20 de septiembre de 2023



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

with the mean of the control lot (landrace 14) would amount to 3.8 % for landrace 10 and 3.5 % for landrace 11, both from the Department of Atlántico. Negative genetic correlations were found between the basic wood density and the growth traits, especially in the diameter ($r_g = -0.694$) and the individual tree volume ($r_g = -0.637$). The landraces with superior productivity identified in the study would increase the genetic base and allow the establishment of new high-yield plantations in the region.

Keywords: Heritability; Genetic gain; Genetic correlation; Forest genetic improvement.

Introducción

Gmelina arborea Roxb. es una especie arbórea de la familia Lamiaceae (De Kok, 2012; Hernández *et al.*, 2013) originaria de hábitats desde húmedos a secos en India, Bangladesh, Sri Lanka, Myanmar, Tailandia y parte del continente asiático (Rojas *et al.*, 2004). La especie se ha introducido en muchos países de América Central y de Suramérica, incluida Colombia (Dvorak, 2004), donde se viene plantando desde 1980 a partir de material genético proveniente mayormente de semillas de un rodal semillero establecido en el suroccidente colombiano (Dvorak, 2004; Osorio, 2004). Actualmente, las plantaciones forestales de la especie cubren 21.024 ha, plantadas principalmente en la costa Atlántica y los valles interandinos por debajo de los 1.000 m de altitud (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR, 2022).

En Colombia *G. arborea* es la especie con las mayores tasas de crecimiento después de *Eucalyptus sp.* (Rodríguez *et al.*, 2011), con incrementos medios anuales entre 20 y 25 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Proexport, 2012) y valores máximos de hasta 35,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Flórez & Flórez, 2013). La especie se considera promisoría por su potencial para el establecimiento de plantaciones industriales en áreas con aptitud forestal ubicadas principalmente en el bosque seco tropical (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA, 2015). *G. arborea* se desarrolla mejor en sitios con una precipitación anual entre 1.750 y 2.300 mm y una estación seca definida de tres a cinco meses (Lamprecht, 1990).

La madera de *G. arborea* se caracteriza por ser moderadamente blanda y liviana, con una densidad básica de 400 kg m⁻³ (Arévalo & Londoño, 2005); se usa principalmente para aserrío, construcciones livianas, muebles, ebanistería, molduras, pisos livianos, instrumentos musicales, guacales y chapas decorativas, tableros aglomerados y pulpa (Rojas *et al.*, 2004; Obregón, 2006; Aparicio & Abril, 2016).

La selección de material genético superior con base en los valores genéticos de rasgos de interés económico es de importancia para la industria forestal. Dicha selección se puede hacer a través de pruebas de procedencias y de progenies (Ipinza, 1998). La genética cuantitativa facilita la estimación de los valores genéticos que trascienden de generación en generación. Uno de los parámetros genéticos de mayor importancia es la heredabilidad (Zobel & Talbert, 1988), cuyos valores expresan el grado en que los progenitores transmiten las características a sus descendencias, lo que permite, asimismo, estimar los beneficios en los programas de selección (Ipinza, 1998).

En Colombia se han desarrollado pruebas de procedencia de *G. arborea* en el Suroccidente colombiano para evaluar procedencias de India, Myanmar y Tailandia y razas locales de Colombia y Costa Rica; los mejores resultados a los tres años de edad fueron obtenidos por una raza local de Costa Rica (Osorio, 2004), lo cual demuestra que la especie se ha adaptado a las condiciones medioambientales del trópico americano y ha dado lugar a razas locales promisorias para los programas de reforestación comercial.

En estudios previos se ha demostrado que *G. arborea* presenta respuestas significativas a la selección estricta de árboles superiores (plus) en términos de crecimiento, rectitud fustal y hábitos de ramificación, lográndose una primera generación de mejoramiento (Rojas *et al.*, 2004). Espitia *et al.* (2016) estimaron ganancias genéticas para árboles plus de *G. arborea* seleccionados en plantaciones de los departamentos de Córdoba y Magdalena de 5, 15, 36 y 34 % para el diámetro, la altura comercial, el volumen comercial y la calidad fustal, respectivamente. En los estudios de Balcorta & Vargas

(2004) se halló un diferencial de selección de 3,8 m en la altura, 4,5 cm en el diámetro y 0,056 m³ en el volumen mediante selección fenotípica. En ensayos de procedencias y progenies, **Hodge & Dvorak** (2004) reportan heredabilidades moderadas en la altura, el diámetro y el volumen, con valores de alrededor de 0,10 h².

El objetivo de este estudio fue evaluar mediante parámetros genéticos los rasgos de crecimiento y las características de la madera en el desarrollo y adaptación de 16 razas locales de *G. arborea* en un ensayo de procedencias establecido en condiciones de bosque seco tropical en el alto Magdalena. Los objetivos específicos fueron: i) determinar la heredabilidad y la ganancia genética de los rasgos de crecimiento y las características de la madera (densidad verde, densidad básica y módulo de elasticidad dinámico) para razas locales de *G. arborea* en el alto Magdalena; y ii) determinar las correlaciones genéticas entre los rasgos objeto de estudio.

Materiales y métodos

El estudio se hizo en el marco de un ensayo de procedencias ubicado en el municipio de Armero-Guayabal, Tolima, Colombia, en las coordenadas 5°00'5,79" de latitud norte y 74°54'27,26" de longitud oeste, a 280 m s.n.m., en una zona de vida de bosque seco tropical (bs-T) que se caracteriza por una temperatura promedio anual de 28,4 °C, una humedad relativa promedio de 71 %, 10 horas de brillo solar diarias, precipitación media anual de 1705,5 mm, con dos periodos de lluvia, uno en los meses de marzo a mayo, y el más fuerte en septiembre y noviembre, cuando se alcanza una precipitación de 300 mm.

El ensayo de procedencias se estableció en marzo de 2011 con plántulas producidas a partir de semillas de 16 razas locales de *G. arborea*. Las razas locales seleccionadas fueron dos fuentes semilleras localizadas en Costa Rica (razas 1 y 2) y catorce en Colombia (razas 3 a 16), estas últimas originarias de los departamentos de Magdalena (razas 3, 8, 12, y 13), Bolívar (razas 4, 5, 6, y 16), Atlántico (razas 10 y 11), César (raza 7), Córdoba (raza 9) y Tolima (razas 14 y 15). La raza local 14 corresponde al primer rodal comercial (posterior rodal semillero) de la especie en el alto Magdalena, establecido en 1997 a partir de semillas provenientes de la costa Atlántica, en tanto que la raza local 15 es una plantación establecida en el 2002 a partir de semillas del rodal semillero (raza 14). Por tal motivo, en el presente estudio la raza local 14 se utilizó como lote de control para efectos de comparación. Antes del establecimiento, el terreno fue preparado a través de arado y subsolado a 60 cm de profundidad sobre las líneas de siembra, lo que permite una mejor expresión del genotipo por la homogenización del terreno (**Rodríguez et al.**, 2011). En el ensayo se adoptó un distanciamiento de siembra de 3 × 3 metros correspondiente a un diseño de bloques completos al azar con 50 bloques, donde la unidad experimental es un árbol por parcela (16 razas × 50 bloques = 800 árboles).

Datos

El ensayo de procedencia se evaluó cuando los árboles tenían nueve años (marzo de 2020) midiendo los siguientes rasgos de crecimiento en todos ellos: diámetro a 1,3 m (d) en centímetros, medido con cinta diamétrica; altura total (h) en metros, medida desde la base hasta el ápice del árbol con un hipsómetro laser Nikon Forestry 550; el volumen total sin corteza (v) de cada árbol se determinó empleando el siguiente modelo predictor de volumen ajustado previamente para *G. arborea* por **López et al.** (2011):

$$v = 0.0228 + 0.000015 \times d^{2.1639} \times h^{1.0327}, \quad (1)$$

donde v es el volumen total sin corteza (m³), d es el diámetro a 1,3 m y h es la altura total.

A partir del conteo del número de árboles se determinó la sobrevivencia de cada raza local determinando el cociente entre el número de individuos vivos sobre el total de individuos plantados (número de repeticiones), lo que permitió observar las razas locales con mayor adaptabilidad a las condiciones ecológicas del área de estudio (**Vásquez**, 2001),

$$S_{\%} = \left(\frac{n_v}{n_p} \right) \times 100, \quad (2)$$

donde $S_{\%}$, n_v y n_b corresponden a la sobrevivencia expresada en porcentaje, número de árboles vivos y número de repeticiones (bloques), respectivamente.

Se obtuvo una estimación del volumen acumulado por hectárea (V_{ha}) (hasta los 9 años) expresado en $m^3 ha^{-1}$, considerando una densidad de plantación de 1,111 árboles ha^{-1} , y teniendo en cuenta la sobrevivencia de cada raza local en el momento de la medición, así:

$$V_{ha} = 1,111 \times \left(\frac{S_{\%}}{100} \right) \times v, \quad (3)$$

donde $S_{\%}$ es la sobrevivencia de la raza local y v el volumen total sin corteza.

Las características de la madera se midieron en una submuestra sistemática del 50 % del total de bloques en el ensayo (25 bloques). Se extrajeron tarugos de madera de 5,15 mm de diámetro con una profundidad de 6 a 7 cm utilizando un barreno de Pressler. Una vez extraídos los tarugos de madera, se dimensionaron a una longitud de 5 cm de corteza a médula y se pesaron con una balanza analítica (precisión de 0,001 g) realizando tres repeticiones para obtener el peso verde. Posteriormente, se midió el diámetro en cada extremo y en la mitad del tarugo. La densidad verde se estimó calculando geoméricamente el volumen del tarugo mediante la siguiente expresión:

$$\rho_v = \frac{P_v}{V_v}, \quad (4)$$

donde ρ_v es la densidad verde ($kg m^{-3}$), P_v el peso verde y V_v el volumen verde del tarugo.

Los tarugos de madera se secaron durante 24 horas a una temperatura de 103 °C hasta obtener un peso seco constante (P_s) en una balanza analítica. La densidad básica se determinó utilizando el método de máximo contenido de humedad con la fórmula propuesta por Smith (1954):

$$\rho_b = \frac{1000}{\frac{P_h - P_s}{P_s} + \frac{1}{\rho_r}}, \quad (5)$$

donde ρ_b es la densidad básica del tarugo ($kg m^{-3}$), P_h el peso de la muestra saturada, P_s el peso de la muestra anhidra y ρ_r la densidad de la pared celular seca ($\sim 1,53$).

El módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) se estimó en los árboles en pie (no destructivamente) utilizando un cronómetro TreeSonic (Fakopp Enterprise Bt.), el cual consta de dos sondas, un transductor de inicio y otro de parada, un cronómetro portátil y un martillo. Las sondas del TreeSonic se insertaron en la albura (a través de la corteza y el cambium) en un ángulo de 45 grados y en la misma dirección longitudinal a 0,8 y 1,8 m de altura en el fuste (Figura 1). Una vez se aplicó el golpe de martillo en el transductor de inicio, el dispositivo midió el tiempo de propagación de la onda de esfuerzo (T_v) entre los transductores de inicio y de parada, distanciados 1 m (d) (Llana *et al.*, 2020). En el estudio se obtuvieron tres medidas de T_v y se promediaron para obtener una estimación del tiempo de vuelo en cada árbol. Mediante la relación d/T_v , se obtuvo la velocidad de propagación de la onda acústica (V). Posteriormente, el módulo de elasticidad dinámico se obtuvo con la relación $MOE_d = \rho_v \cdot V^2$, donde V es la velocidad de la onda acústica y ρ_v es la densidad verde promedio de la madera en cada individuo.

Análisis de datos

Los datos estadísticos descriptivos se calcularon empleando el programa Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 2009). Los componentes de varianza de los rasgos objeto de estudio se obtuvieron con el método de máxima verosimilitud restringida (REML) utilizando el programa Selegen REML/BLUP (Resende, 2014), aplicando el siguiente modelo lineal mixto:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}_r + \mathbf{Z}_g + e, \quad (6)$$

donde \mathbf{Y} es el vector de datos de rasgos de interés, r es el vector de los efectos de repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, g es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), y e es el vector de residuos (aleatorios), en tanto que X y Z son matrices de incidencia para dichos efectos (Resende, 2002; 2006).



Figura 1. Esquema metodológico de la medición de MOE_d en árboles de *G. arborea* en pie

Heredabilidad

La heredabilidad en sentido amplio a nivel individual, que refleja los efectos genotípicos totales de las razas locales, se estimó como (Santos *et al.*, 2021):

$$H_i^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_f^2} = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_e^2} \tag{7}$$

y la heredabilidad media de las razas locales como

$$H_p^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_e^2/r} \tag{8}$$

donde H_i^2 y H_p^2 corresponden a la heredabilidad en sentido amplio individual y la media de las razas locales, respectivamente, σ_g^2 es la varianza entre razas locales, σ_e^2 es la varianza residual, σ_f^2 es la varianza fenotípica y r es el número de repeticiones.

Ganancia genética

La ganancia genética (ΔG) se calculó como el producto entre la heredabilidad en sentido amplio (H_p^2) y el diferencial de selección (S) (Zobel & Talbert, 1988), y este se determinó a partir de la diferencia entre el volumen acumulado medio de la raza local y el volumen acumulado medio del lote de control (raza local 14), empleando la siguiente expresión:

$$\Delta G = H_p^2 \times S, \tag{8}$$

donde H_p^2 es la heredabilidad media de las razas locales y S es el diferencial de selección.

Correlaciones genéticas

La correlación genética (r_g) entre los rasgos x e y fue calculada como

$$r_g = \frac{COV_{(xy)}}{\sqrt{\sigma_{(x)}^2 \times \sigma_{(y)}^2}}, \tag{9}$$

donde $COV_{(xy)}$, $\sigma_{(x)}^2$ y $\sigma_{(y)}^2$ corresponden a la covarianza y a las varianzas genéticas para los rasgos x e y . La significación de los coeficientes de correlación se evaluó empleando la prueba estadística *t-Student* (Llanos *et al.*, 2019).

Resultados y discusión

Descripción del ensayo

Se muestrearon 733 árboles de *G. arborea*, los cuales tenían diámetros de 2,7 a 51,5 cm ($21,4 \pm 6,6$ cm), con una altura total promedio de $21 \pm 4,3$ m y un volumen individual promedio de $0,349 \pm 0,252$ m³ árbol⁻¹. Asimismo, se muestrearon no destructivamente 342 árboles (47 %) para caracterizar la madera de la especie. La densidad verde fue, en promedio, de $939,67 \pm 114,3$ kg m⁻³, la densidad básica varió entre 338,2 y 534,7 kg m⁻³ (promedio de $431,3 \pm 32,2$ kg m⁻³) y el módulo de elasticidad dinámico entre 6,0 y 14,06 GPa (promedio de $9,35 \pm 1,37$ GPa) entre individuos (**Figura 2**).

Sobrevivencia

Las razas locales de *G. arborea* presentaron una alta sobrevivencia, con un valor medio de 91,6 % que osciló entre 86 y 98 % (**Figura 3, Tabla 1**). Como se muestra en la **figura 3**, diez razas locales superaron el promedio de sobrevivencia del ensayo. Estos valores demuestran que las razas locales de *G. arborea* evaluadas se adaptaron satisfactoriamente a las condiciones medioambientales del alto Magdalena, región que se destaca por presentar sitios con condiciones adecuadas que suplen en mayor medida los requerimientos para el desarrollo de la especie (**Rojas et al., 2004**): una altitud menor a 1.000 m s.n.m. (**Obregón, 2006; Barrios et al., 2021**); un régimen de precipitación anual con periodos secos (**Lamprecht, 1990**), y suelos con texturas francas o franco arcillosas (**Henri, 2001; Urrego, 2004**).

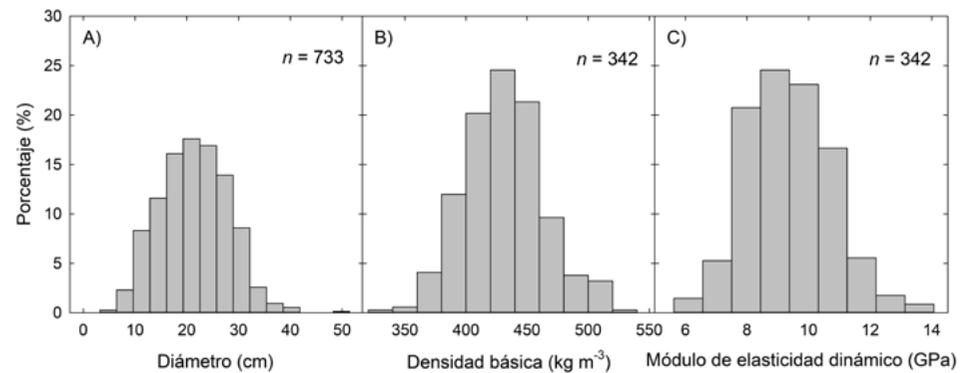


Figura 2. Variabilidad del diámetro, densidad básica y módulo de elasticidad dinámico de la madera en árboles de *G. arborea*

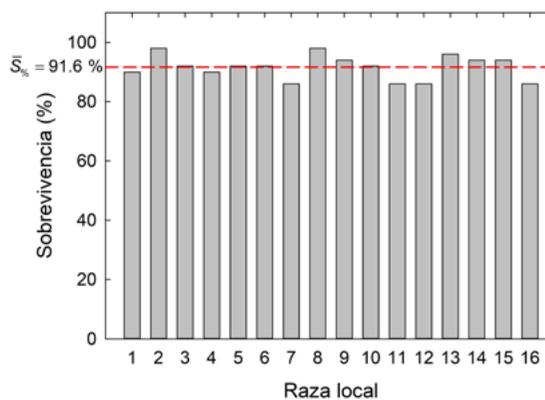


Figura 3. Sobrevivencia de 16 razas locales de *G. arborea* en el alto Magdalena. La sobrevivencia media se señala con una línea discontinua roja.

Tabla 1. Datos de estadística descriptiva para sobrevivencia, rasgos de crecimiento y características de la madera en 16 razas locales de *G. arborea* a los 9 años en el municipio de Armero-Guayabal, Tolima

Raza local	Sobrevivencia (%)	Diámetro (cm)	Altura total (m)	Volumen individual (m ³ árbol ⁻¹)	Volumen acumulado (m ³ ha ⁻¹)	Densidad verde (kg m ⁻³)	Densidad básica (kg m ⁻³)	Módulo de elasticidad (GPa)
1	90	20,9 ± 5,9 (45)	21,0 ± 3,8	0,322 ± 0,194	321,6 ± 194,1	956,1 ± 114,7 (20)	423,8 ± 32,8	9,56 ± 1,99
2	98	20,8 ± 6,3 (49)	20,8 ± 4,6	0,327 ± 0,229	356,2 ± 249,7	925,8 ± 119,9 (22)	433,2 ± 33,1	9,37 ± 1,26
3	92	21,3 ± 5,4 (46)	20,7 ± 3,6	0,321 ± 0,192	327,7 ± 196,6	961,0 ± 112,7 (23)	429,2 ± 33,6	9,61 ± 1,47
4	90	21,5 ± 6,2 (45)	21,1 ± 4,2	0,344 ± 0,223	343,8 ± 222,9	932,7 ± 102,6 (22)	429,0 ± 23,7	9,22 ± 1,18
5	92	21,4 ± 7,2 (46)	21,1 ± 4,5	0,360 ± 0,280	367,7 ± 286,7	941,6 ± 145,4 (20)	435,3 ± 36,4	9,54 ± 1,25
6	92	22,1 ± 6,8 (46)	21,6 ± 4,5	0,378 ± 0,269	385,9 ± 275,4	948,3 ± 119,7 (20)	427,6 ± 25,9	9,47 ± 1,12
7	86	20,8 ± 6,3 (43)	20,7 ± 4,2	0,321 ± 0,217	306,5 ± 207,3	916,1 ± 117,1 (22)	435,8 ± 36,1	9,07 ± 1,47
8	98	21,9 ± 6,7 (49)	21,3 ± 4,3	0,365 ± 0,244	397,7 ± 265,5	940,7 ± 103,6 (23)	434,5 ± 31,6	9,50 ± 1,34
9	94	22,3 ± 7,4 (47)	21,1 ± 4,5	0,383 ± 0,263	400,4 ± 275,0	987,2 ± 113,3 (23)	427,0 ± 24,0	9,67 ± 1,05
10	92	23,2 ± 6,5 (46)	22,1 ± 4,2	0,413 ± 0,261	422,5 ± 267,0	912,6 ± 89,3 (21)	424,8 ± 29,7	8,91 ± 1,13
11	86	22,7 ± 8,7 (43)	21,3 ± 4,6	0,432 ± 0,427	413,1 ± 408,1	927,8 ± 99,4 (20)	422,9 ± 32,3	9,66 ± 1,58
12	86	21,2 ± 6,2 (43)	21,5 ± 4,5	0,341 ± 0,219	325,6 ± 209,1	942,5 ± 120,2 (23)	437,7 ± 32,6	9,35 ± 1,37
13	96	19,5 ± 7,1 (48)	19,7 ± 4,6	0,294 ± 0,251	313,6 ± 267,8	933,7 ± 119,3 (20)	442,2 ± 34,7	8,67 ± 1,71
14	94	20,2 ± 6,0 (47)	20,7 ± 4,0	0,300 ± 0,214	313,6 ± 223,2	934,9 ± 117,0 (22)	438,1 ± 32,9	9,23 ± 1,47
15	94	21,5 ± 6,8 (47)	20,6 ± 4,2	0,347 ± 0,237	362,6 ± 247,7	941,8 ± 99,0 (20)	431,6 ± 41,5	9,29 ± 1,37
16	86	21,1 ± 6,4 (43)	21,1 ± 4,3	0,337 ± 0,225	322,3 ± 214,7	927,8 ± 141,3 (21)	427,0 ± 35,2	9,48 ± 1,03
N	733	733	733	733	733	342	342	342
Media ± DE	91,6 ± 4,1	21,4 ± 0,9	21 ± 0,5	0,349 ± 0,038	355,1 ± 38,9	938,9 ± 18,5	431,2 ± 5,7	9,34 ± 0,30
CV%	4,45	4,28	2,51	10,92	10,95	1,97	1,31	3,16

Nota: los valores para cada raza local corresponden a la media ± desviación estándar (DE) de cada rasgo y en paréntesis aparece el número de árboles muestreados (n). Además, se presenta el número de árboles totales muestreados (N), la media ± desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV%) entre razas locales.

Variabilidad de los rasgos de crecimiento y las características de la madera

Todos los rasgos analizados presentaron una baja variabilidad entre las razas locales (**Tabla 1**). El volumen individual y el acumulado fueron los rasgos con mayor variabilidad entre las razas locales, con coeficientes de variación de 10,9 %. Las características de la madera variaron poco en las razas locales, con coeficientes de variación menores a 3 % (**Tabla 1**). Esta baja variabilidad en las características de la madera se ha reportado tanto en especies latifoliadas como en coníferas (**Espinoza, 2003; Barrios et al., 2017; Escobar-Sandoval et al., 2018**).

En general, las razas locales de *G. arborea* presentaron un buen desarrollo, con 19,5 a 23,2 cm de diámetro y 19,7 a 22,1 m de altura total. El volumen acumulado a los nueve años varió entre 306,5 y 422,5 m³ ha⁻¹ (34 - 47 m³ ha⁻¹ año⁻¹), con una media de 355,1 m³ ha⁻¹ (39,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹). Estos valores son mayores a los reportados en plantaciones operativas en Colombia. **Barrios et al. (2021)** reportaron volúmenes máximos de 202,1 m³ ha⁻¹ en plantaciones operativas con edad media de 8 años en varios sitios de Colombia. **Flórez & Flórez (2013)** reportaron en *G. arborea* incrementos medios anuales de 35,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a edades tempranas en el Bajo Atrato, Chocó, Colombia.

La densidad básica de la madera osciló entre 422,9 y 442,0 kg m⁻³ (promedio de 431,2 kg m⁻³) en las razas locales evaluadas, lo que según **Arévalo & Londoño (2005)** cataloga la madera como moderadamente blanda y liviana. Los valores encontrados en el presente estudio resultaron similares a los reportados por **Lauridsen & Kjaer (2002)**,

quienes reportaron variaciones en la densidad entre 350 y 535 kg m⁻³, y por **Espinoza** (2004), quien encontró que la densidad básica de procedencias de *G. arborea* de 7 años de edad variaba entre 411 a 440 kg m⁻³ en un sitio en Venezuela. Sin embargo, los valores de densidad básica encontrados son menores a los reportados por **Moya & Tomazello** (2009), quienes obtuvieron densidades de 440 a 687 kg m⁻³ en árboles de *G. arborea* de uno hasta 12 años en Costa Rica. Asimismo, son menores a las reportados por **González** (2009), de 486 a 590 kg m⁻³, en árboles de 8 a 13 años en plantaciones sin manejo en la costa norte de Colombia.

El módulo de elasticidad dinámico presentó valores de 8,6 a 9,7 GPa en las razas locales. Los valores son ligeramente menores a los reportados por **Méndez** (2016) en árboles de *G. arborea* de 11 años en Costa Rica. Estos autores reportaron un módulo de elasticidad dinámico de 10,22 GPa. El módulo también concuerda con lo reportado por **González** (2009), de 9,8 a 11,9 GPa en árboles de 8 y 13 años que crecían en plantaciones sin manejo en la costa norte de Colombia.

Heredabilidad

La varianza residual o varianza dentro de las razas locales (σ_e^2) fue la mayor fuente de variación entre los rasgos evaluados en el ensayo, superior a la varianza genética (σ_g^2). Rasgos de crecimiento como el diámetro y la altura total presentaron heredabilidades bajas ($H_p^2 = 0,07$ y $0,04$, respectivamente), similares a las reportadas por **Hodge & Dvorak** (2004). En otras especies se han reportado valores de heredabilidad de 0,80 a 0,96 en la altura total de *Juglans regia* L. (**Díaz & Fernández**, 2001). De igual manera, **Mora** (2006) reportó valores de heredabilidad en altura total de 0,48 a 0,76 para *Eucalyptus sp.* Sin embargo, también se han reportado valores bajos de heredabilidad: para la altura total, **Pastrana et al.** (2012) reportaron una heredabilidad menor a 0,02 en *Acacia mangium*. Para la misma especie, **Pavlotzky & Murillo** (2013) reportaron heredabilidades altas, de 0,93, para el diámetro a los 4 años. Asimismo, **Mora** (2006) reportó heredabilidades en el diámetro de 0,26 a 0,39 para *Eucalyptus sp.* En cuanto al volumen, en *Tectona grandis* se han reportado valores de heredabilidad de 0,246 a una edad de 4,5 años (**Molina**, 2017). En estas especies latifoliadas se han reportado valores mayores a los estimados en nuestro estudio, lo que demuestra un mejor control genético en las variables evaluadas.

Debido a que las características cuantitativas (diámetro, altura total) que se midieron están relacionadas con el rendimiento (volumen individual y acumulado), se esperaría que estas también muestren valores bajos de heredabilidad. Sin embargo, en el estudio se destacaron los valores de heredabilidad en el volumen individual ($H_p^2 = 0,1158$) y el acumulado ($H_p^2 = 0,1095$). Las características de la madera también evidenciaron una baja variabilidad, lo que se tradujo en una baja heredabilidad, con valores de $H_p^2 \leq 0,038$ (**Tabla 2**). Los valores de heredabilidad obtenidos para los rasgos estudiados indican muy poco control genético, lo cual podría deberse a que en el estudio sólo se muestreó el 50 % de los

Tabla 2. Parámetros genéticos de los rasgos objeto de estudio en un ensayo de 16 razas locales de *G. arborea*

Parámetro	Diámetro	Altura total	Volumen individual	Volumen acumulado	Densidad verde	Densidad básica	Módulo de elasticidad
σ_g^2	0,0712	0,0169	0,0002	162,0293	12,8659	1,1791	0,0028
σ_e^2	44,4318	18,3304	0,0638	65897,2905	11799,8546	925,5123	1,7190
σ_f^2	44,5029	18,3473	0,0640	66059,3198	11812,7205	926,6913	1,7218
H_i^2	0,0016	0,0009	0,0026	0,0025	0,0011	0,0013	0,0016
H_p^2	0,0742	0,0442	0,1158	0,1095	0,0265	0,0309	0,0387

σ_g^2 : varianza genética, σ_e^2 : varianza residual, σ_f^2 : varianza fenotípica, H_i^2 : heredabilidad individual en sentido amplio, H_p^2 : heredabilidad media de razas locales asumiendo sobrevivencia completa

individuos del ensayo, y en estudios previos se ha reportado que el número de árboles por procedencia tiene un efecto importante en la estimación de parámetros genéticos como la heredabilidad (Escobar-Sandoval *et al.*, 2018).

Ganancia genética

En la **figura 4** se presenta la ganancia genética esperada para el volumen acumulado con respecto a la media del lote de control (raza 14). En general, 13 razas locales superaron el volumen acumulado del lote de control, con diferenciales de selección que iban desde 8,1 m³ ha⁻¹ hasta 108,9 m³ ha⁻¹. Las ganancias genéticas variaron entre 0,9 m³ ha⁻¹ (0,3 %) y 11,9 m³ ha⁻¹ (3,8 %). Se destacaron las razas locales 10 y 11, con ganancias de 11,9 (3,8 %) y 10,9 m³ ha⁻¹ (3,5 %) (**Figura 4**), ambas procedentes del departamento de Atlántico, municipios de Repelón (10) y Sabanalarga (11).

Correlaciones genéticas

En la **tabla 3** se presentan las correlaciones genéticas de los rasgos evaluados en las 16 razas locales de *G. arborea*. En la **figura 5** se muestra la relación entre los valores fenotípicos y genéticos del volumen acumulado (**Figura 5a**) y de la densidad básica (**Figura 5b**) con

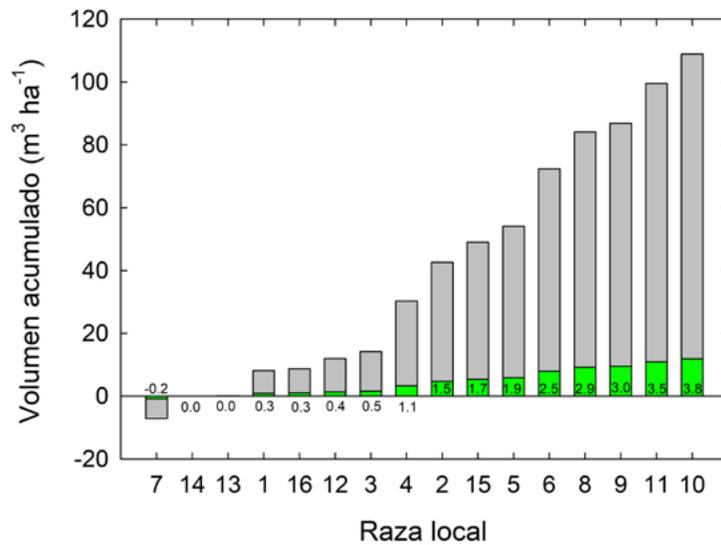


Figura 4. Ganancia en volumen por hectárea para razas locales de *G. arborea* en el alto Magdalena, Colombia. Las barras grises indican el diferencial de selección (S) y las verdes la ganancia genética esperada con respecto a la media del lote de control (raza 14). Los valores en cada barra indican la ganancia genética esperada en porcentaje.

Tabla 3. Coeficientes de correlación genética entre los rasgos de crecimiento y las características de la madera en razas locales de *G. arborea*

Rasgo	Altura total	Volumen individual	Volumen acumulado	Densidad verde	Densidad básica	Módulo de elasticidad
Diámetro	0,845**	0,945**	0,889**	0,050 ^{ns}	-0,694**	0,292 ^{ns}
Altura total		0,766**	0,671**	-0,142 ^{ns}	-0,518*	0,244 ^{ns}
Volumen individual			0,922**	-0,019 ^{ns}	-0,637**	0,278 ^{ns}
Volumen acumulado				0,041 ^{ns}	-0,506*	0,211 ^{ns}
Densidad verde					-0,126 ^{ns}	0,585*
Densidad básica						-0,450 ^{ns}

^{ns} no significativo; * significativo para $\alpha=0,05$; ** significativo para $\alpha=0,01$

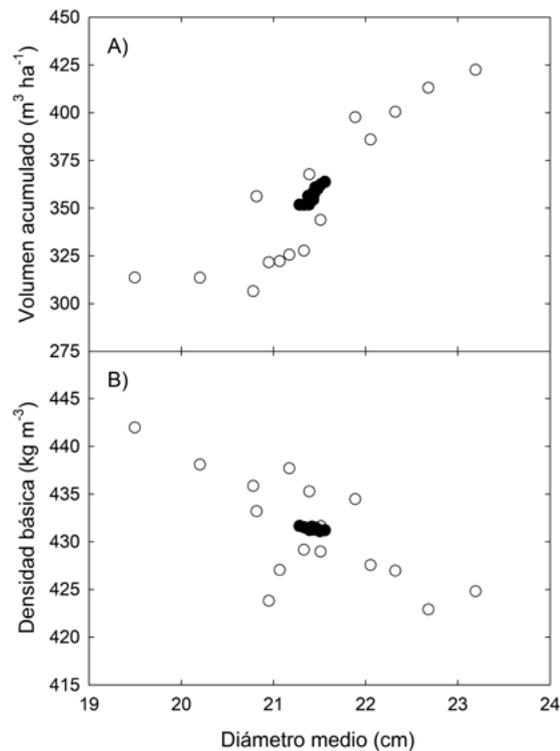


Figura 5. Relación entre el diámetro medio y el volumen acumulado a los 9 años (a) y la densidad básica de la madera (b). Los puntos sin relleno indican los valores fenotípicos y los puntos con relleno negro, los valores genéticos.

respecto al diámetro medio de las 16 razas locales de *G. arborea*. Dichos valores resaltan la gran variabilidad fenotípica de los individuos del ensayo, sin embargo, la variación genética en las tres variables fue muy baja. Como era de esperarse, el volumen individual y el acumulado presentaron correlaciones genéticas significativas y positivas con el diámetro y la altura total, lo que indica que los árboles de mayor tamaño presentan mayor volumen de madera (**Figura 5a**). Este resultado concuerda con lo descrito por **Llanos et al.** (2019) en un ensayo de progenies de *T. grandis* en Colombia.

Entre las características de la madera se observó una correlación genética positiva entre el módulo de elasticidad y la densidad verde ($r_g = 0,585$, $p < 0,05$), lo que era de esperarse, ya que este último rasgo es empleado en la fórmula de cálculo del módulo de elasticidad. La densidad básica no mostró correlación con la densidad verde ni con el módulo de elasticidad. En el análisis de correlación se encontraron correlaciones genéticas negativas entre la densidad básica y todos los rasgos de crecimiento, principalmente el diámetro ($r_g = -0,694$, $p < 0,01$) y el volumen individual ($r_g = -0,637$, $p < 0,01$). Este resultado concuerda con el obtenido por **Espinoza** (2003), quien reportó correlaciones genéticas negativas ($-0,92 \geq r_g \geq -0,30$) entre la gravedad específica de la madera y el diámetro en ensayos de procedencia de *G. arborea* en Venezuela. Este mismo comportamiento se mantiene al observar los valores fenotípicos medios para las razas (**Figura 5b**), comportamiento también descrito por **Moya & Tomazello** (2007), quienes encontraron correlaciones negativas ($r = -0,47$) entre la densidad de la madera y las tasas de crecimiento diamétrico en *G. arborea* en Costa Rica. La correlación negativa observada entre el diámetro medio y la densidad básica media de la madera de las razas locales se explicaría por la presencia de madera juvenil, dada la edad de los árboles en el momento de la evaluación (9 años), lo que podría cambiar a medida que los árboles formen madera madura (**Moya & Tomazello**, 2009; **Barrios et al.**, 2017). Además, debido a que la densidad básica de la madera presentó

una baja variabilidad entre razas, con un CV% = 1,31 %, la correlación negativa observada no implica pérdidas importantes en la densidad de la madera con respecto a razas locales con mayores tasas de crecimiento.

Conclusiones

La heredabilidad de los rasgos de crecimiento y las características de la madera de *G. arborea* fue baja en este ensayo de razas locales en un sitio en el alto Magdalena. Los rasgos con mayor heredabilidad media fueron el volumen individual ($H^2_p = 0,1158$) y el acumulado ($H^2_p = 0,1095$). Las ganancias genéticas en el volumen acumulado serían de 3,8 % y 3,5 % con respecto a la media del lote de control (raza 14) para las mejores razas locales. El estudio permitió establecer que las dos mejores razas locales de *G. arborea* provienen del departamento de Atlántico, Colombia.

Se presentaron correlaciones genéticas altamente significativas entre el diámetro, la altura, el volumen de árbol individual y el volumen acumulado por hectárea ($p < 0,01$). En el estudio también se encontraron correlaciones genéticas significativas entre la densidad básica de la madera y los rasgos de crecimiento, especialmente el diámetro ($r_g = -0,694$) y el volumen individual ($r_g = -0,637$). Debido a que la densidad básica de la madera presentó una baja variabilidad entre razas, con un rango entre 423 y 442 kg m⁻³, dicha correlación no implica pérdidas importantes en la densidad de la madera con respecto a razas locales con mayores tasas de crecimiento. Sin embargo, es preciso adelantar nuevos estudios que incluyan más sitios de muestreo para determinar si esta relación negativa se mantiene en sitios con otras condiciones.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación-Creación, Innovación, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Tolima por el apoyo financiero otorgado al estudio a través del Proyecto No. 170119.

Contribuciones de los autores

Los dos autores participaron en cada una de las fases y secciones del estudio y en todo lo relacionado con la recolección, manejo, procesamiento y análisis de los datos y la discusión de los resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Aparicio, L., Abril, D.** (2016). *Calidad nutricional y producción de forraje de melina Gmelina arborea en bancos forrajeros en el piedemonte llanero*. Tesis de pregrado, Universidad de la Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/zootecnia/52>
- Arévalo, R., Londoño, A.** (2005). *Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima*. Universidad del Tolima.
- Balcorta, H., Vargas, J.** (2004). Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 13-19.
- Barrios, A., Trincado, G., Watt, M.S.** (2017). Wood properties of juvenile and mature wood of *Pinus radiata* D. Don trees growing on contrasting sites in Chile. *Forest Science*, 63(2), 184-191. <https://doi.org/10.5849/forsci.2016-060>
- Barrios, A., López, A., Báez, C.** (2021). Modelamiento de la productividad de *Gmelina arborea* Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colombia Forestal*, 24(1), 71-87. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15345>
- De Kok, R.** (2012). A revision of the genus *Gmelina* (Lamiaceae). *Kew Bulletin*, 67(3), 293-329. <https://doi.org/10.1007/s12225-012-9382-4>
- Díaz, R., Fernández, J.** (2009). *Evaluación de un ensayo de progenie de Juglans regia L. en Galicia*. Departamento de producción forestal. CIFA Lourizán.

- Dvorak, W.** (2004). World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forests*, 28, 111–126. <https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040940.32574.22>
- Escobar-Sandoval, M.C., Vargas-Hernández, J.J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S., Borja-de la Rosa, A.** (2018). Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 24, 2, e2421595.
- Espinoza, J.A.** (2003). *Genetic variation in wood density of Gmelina arborea planted on different sites in western Venezuela*. Tesis Doctoral, North Carolina State University.
- Espinoza, J.A.** (2004). Within-tree density gradients in *Gmelina arborea* in Venezuela. *New Forest*, 28, 309-317.
- Espitia, M., Murillo, O., Castillo, C.** (2016). Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba (Colombia). *Revista Árvore*, 40(1), 71-80.
- Flórez, J. A., Flórez, O. R.** (2013). *Estudio del crecimiento de "Gmelina arborea" en los consejos comunitarios de Quiparadó y Domingodó (Chocó – Colombia)*. Tesis de maestría, Universidad de Manizales.
- González, H.** (2009). *Stand structure development effects on wood quality of melina (Gmelina arborea Roxb.)*. Ph.D. Thesis, University of Missouri.
- Henri, C.** (2001). Soil-site productivity of *Gmelina arborea*, *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* forest plantations in western Venezuela. *Forest Ecology and Management*, 144, 255–264. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00390-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00390-X)
- Hernández, A., Rojas, A., Hine, A., Daquinta, M.** (2013). Multiplicación in vitro de *Gmelina arborea* Roxb. en sistemas de inmersión temporal. *Biotecnología Vegetal*, 13(3), 153-159.
- Hodge, G., Dvorak, W.** (2004). The CAMCORE international provenance/progeny trials of *Gmelina arborea*: genetic parameters and potential again. *New Forests*, 28(2), 147-166.
- Ipinza, R.** (1998). *Mejoramiento genético forestal*. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal – CONIF.
- Lamprecht, H.** (1990). *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas-posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Eschborn: TZ-Verlag-Ges.
- Llana, D.F., Short, I., Harte, A.M.** (2020). Use of non-destructive test methods on Irish hardwood standing trees and small-diameter round timber for prediction of mechanical properties. *Annals of Forest Science*, 77, 62. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>
- Llanos, L.F., Barrios, A., López, A.M.** (2019). Variación genética en familias de polinización abierta de *Tectona grandis* L.f. en Colombia. *Colombia Forestal*, 22 (2), 30-43.
- Lauridsen, E.B., Kjaer, E.D.** (2002) Provenance research in *Gmelina arborea* Linn., Roxb. A summary of results from three decades of research and a discussion of how to use them. *International Forestry Review*, 4, 20-29.
- López, M., Barrios, A., Trincado, G., Nieto, V.** (2011). *Monitoreo y modelamiento del crecimiento para el manejo de plantaciones forestales comerciales*. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal – CONIF.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR).** (2022). Boletín estadístico forestal, marzo 2022. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR).
- Molina, F.** (2017). *Comportamiento de clones de teca (Tectona grandis Linn) a los 4.5 años en Upala, Zona Norte de Costa Rica*. Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Mora, F.** (2006). Heredabilidad y valor genético (REM/BLUP) en genotipos de un eucalipto tolerante a la sequía en el Norte de Chile. *Ciencia Florestal*, (16) 2, 145-151.
- Moya, R., Tomazello, M.** (2007). Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(3), 267-276.
- Moya, R., Tomazello, M.** (2009). Wood density variation and tree ring demarcation in *Gmelina arborea* trees using x-ray densitometry. *CERNE*, 15(1), 92-100.
- Osorio, L.F.** (2004) Provenance results of *Gmelina arborea* in southwest Colombia at three years of age. *New Forests*, 28, 179-185. doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040944.23096.08
- Obregón, C.** (2006). *Gmelina arborea*: versatilidad, renovación y productividad sostenible para el futuro. *Revista el mueble y la madera*, 50, 14-20.
- Pastrana, V., Espitia, C., Murillo, O.** (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*, 61(2), 143-150.
- Pavlotzky, B., Murillo, O.** (2013). Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en San Carlos, zona Norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 10(24), 14-25.
- Resende, M.D.V.** (2002). Software Selegen-Reml/Blup. Embrapa Florestas.

- Resende, M.D.V.** (2006). O Software Selegen-Reml/Blup. Embrapa. Florestas.
- Resende, M.D.V.** (2014). Sistema estatístico e seleção genética computadorizada SELEGEN REML/BLUP. Embrapa Florestas.
- Proexport.** (2012). *Sector forestal en Colombia, Promoción de turismo, Inversión y exportaciones – PROEXPORT Colombia*. PROEXPORT.
- Rodríguez, J., Urueña, E., Borralho, N.** (2011). *Mejoramiento de semillas para incrementar las plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.F.) y melina (*Gmelina arborea* Roxb) en el departamento del Tolima*. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal – CONIF.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., Arguedas, M.** (2004). *Manual para productores de melina, Gmelina arborea en Costa Rica*. Instituto Técnico de Costa Rica.
- Santos, W., Aguiar, A.V., Souza, B.M., Araujo, D., Machado, C., Moraes, M.L., Sebbenn, A.M., Freitas, M.L.** (2021). Performance and genetic variation in a provenance test of *Araucaria cunninghamii*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 56, e02170. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02170>.
- Smith, M.D.** (1954). *Maximum moisture content method for determining specific gravity of small samples*. Madison WI.
- Stastical Analysis System Institute Inc. (SAS)** (2009). *SAS/STAT® 9.2 User's Guide, Second Edition*. SAS® Publishing.
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA.** (2015). *Zonificación para plantaciones forestales con fines comerciales-Colombia, escala 1:100.000*. Memoria técnica. UPRA.
- Urrego, J.** (2004). Growth potential of *Gmelina arborea* at 3 years of age in Colombia. *New Forests*, 28, 269-276.
- Vásquez, A.** (2001). *Silvicultura de plantaciones forestales en Colombia*. Universidad del Tolima.
- Zobel, B., Talbert, J.** (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. Limusa.