

Selección temprana de clones de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en sistemas agroforestales

Early selection of mahogany clones (*Swietenia macrophylla* King) in agroforestry systems

Eugenio Corea-Arias¹  • Orlando Chinchilla-Mora¹  • Víctor Meza-Picado¹  • Carlos Ávila-Arias¹ 

Recibido: 15/11/2019

Aceptado: 06/05/2020

Publicado: 28/07/2020

Abstract

In Costa Rica, producing wood in pure plantations has become less competitive compared to other land uses. Establishing timber species through agroforestry production systems emerges as an alternative to make forestry a profitable activity. Mahogany has been proven in a wide variety of agroforestry systems. The identification and use of genetically superior material for different places or areas contributes to significantly increase the growth rates and the quality of the generated products. The objective of the present investigation was to select clones that register superior performance in two evaluated conditions, with the consequent increase in yields per unit area. Two clonal trials of mahogany under different site conditions were evaluated at three years of age, to select the genotypes with the best performance in total volume. At site Venecia, average growth in dbh for the clonal set was 9.3 cm*tree⁻¹, which represents a MAI of 3.1 cm*tree⁻¹*year⁻¹ at 36 months of age. Clones 3, 98, 1, 78, 52 and 5 were identified to continue in the genetic improvement program for this site. Their use would generate an average volume at 36 months of 0.0399 m³*arb⁻¹. At site Santa Lucía, a MAI of 1.8 cm*tree⁻¹*year⁻¹ was recorded, 58 % lower than site Venecia. Clones 96, 21 and 57 were identified to remain in the breeding program. The remaining clones should be discarded for commercial reforestation, but kept in germplasm banks for future purposes.

Key words: Genetic set, performance, AFS, superiority, Costa Rica.

1. Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional (INISEFOR - UNA); Heredia, Costa Rica.
eugeniocorea@hotmail.com, orlando.chinchilla.mora@una.ac.cr, victor.meza.picado@una.ac.cr, carlos.avila.arias@una.ac.cr,

Resumen

En Costa Rica, producir madera en plantaciones puras se ha vuelto poco competitivo frente a otros usos de la tierra. Establecer especies maderables mediante sistemas de producción agroforestal surge como una alternativa para rentabilizar la actividad. La caoba ha sido comprobada como una opción real para gran variedad de sistemas agroforestales. La identificación y uso de material genéticamente superior para diversos lugares o zonas contribuye a incrementar significativamente las tasas de crecimiento y la calidad de los productos generados. El objetivo de la presente investigación fue seleccionar clones que registraran desempeño superior en dos condiciones evaluadas, con el consecuente incremento en los rendimientos por unidad de área. Se evaluaron dos ensayos clonales de caoba de tres años de edad en condiciones de sitio distintas, con el fin de elegir los genotipos con el mejor desempeño en volumen total. En el sitio Venecia se registró un crecimiento promedio en DAP para el conjunto clonal de $9,3 \text{ cm}^3 \text{ arb}^{-1}$, lo que representa un IMA de $3,1 \text{ cm}^3 \text{ arb}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 36 meses. Los clones 3, 98, 1, 78, 52 y 5 fueron seleccionados para continuar en mejoramiento genético para este sitio. Su uso generaría un volumen promedio a los 36 meses de $0,0399 \text{ m}^3 \text{ arb}^{-1}$. En el sitio Santa Lucía se registró un IMA en DAP de $1,8 \text{ cm}^3 \text{ arb}^{-1} \text{ año}^{-1}$, 58 % menor al sitio Venecia. Se identificaron los clones 96, 21 y 57 para permanecer en el programa de mejoramiento. Los restantes clones deberían descartarse para reforestación comercial, pero conservarse en bancos de germoplasma para objetivos futuros.

Palabras clave: Conjunto genético, desempeño, SAF, superioridad, Costa Rica.

Introducción

En Costa Rica, el cultivo de madera en plantaciones puras se ha vuelto poco competitivo frente a otros usos de la tierra que registran mayor rentabilidad, al menos en el mediano y corto plazo, como por ejemplo la piña y cultivos agrícolas de ciclo corto. De la misma manera, la palma aceitera, café, cacao y árboles frutales significan una fuerte competencia por la tierra.

Ligado a ello, los esquemas de producción a pequeña escala, así como el alto costo de la tierra y de mano de obra también han contribuido a que la madera de plantaciones puras no pueda competir con la de países como Brasil, Chile, Colombia y Venezuela, donde existen grandes extensiones dedicadas a especies de

rápido crecimiento, tales como melina, pino y eucalipto. Lo anterior, aunado a un crecimiento acelerado en el consumo de madera en la última década y la disminución registrada en la tasa de reforestación comercial en el mismo lapso, tiene al país frente a una crisis en el suministro de materia prima forestal proveniente de fuentes renovables [1].

Ante dicho panorama, el cultivo de especies maderables mediante sistemas de producción agroforestal surge como una alternativa para rentabilizar la actividad, debido a que muchos de sus costos son atribuibles al cultivo agrícola asociado a los árboles. Además, la gran mayoría de las fincas existentes en Costa Rica son de pequeño tamaño, por lo que es necesario buscar el máximo aprovechamiento de los terrenos de cultivo, es decir obtener la mayor productividad por área de superficie. Por lo anterior, las especies maderables de alto valor y rápido crecimiento representan una excelente opción para aumentar la rentabilidad del sistema como un todo. La caoba presenta alto valor económico, buen crecimiento, y ha sido comprobada como una opción real a utilizar en una gran variedad de sistemas agroforestales y condiciones de sitio [2], [3], [4]. La calidad, belleza y facilidad para trabajar su madera la han convertido en una de las especies forestales del Neotrópico más reconocida, apetecida y, por consiguiente, de mayor importancia comercial [5], [6].

No obstante, para maximizar la rentabilidad del cultivo de caoba es necesario contar con un paquete tecnológico silvicultural, adecuado a las necesidades de la especie y adaptable a distintas condiciones de sitio [4]. Al respecto, la identificación y uso de material genéticamente superior para diversos lugares o zonas, contribuye a incrementar significativamente las tasas de crecimiento y la calidad de los productos generados [2]. Como resultado, se lograría un aumento significativo en la productividad neta de madera comercial y una reducción en los turnos de corta, lo que se traduce en una mayor rentabilidad [7].

Con el fin de contribuir al cultivo rentable de la caoba, el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), ha desarrollado durante los últimos 13 años un programa para el mejoramiento genético de la especie. Ello mediante, entre otras cosas, de una red de experimentos de campo, a partir de los cuales se han seleccionado y multiplicado genotipos superiores para continuar con el proceso de selección genética [3], [4]. No obstante, es necesario evaluar dichos genotipos bajo distintas condiciones de sitio. Con este objetivo se han establecido ensayos clonales en sistemas agroforestales, para evaluar su comportamiento general e individual, ratificar la idoneidad de la especie para ser combinada con diferentes cultivos agrícolas e identificar los genotipos a recomendar a los productores. Esto

facilitará la planificación y el ordenamiento forestal dirigido hacia un manejo intensivo, de la caoba para este caso en particular. [8] ratifica lo anterior al apuntar que, a pesar de que *S. macrophylla* es una especie con alto valor económico, existe poca información cuantitativa acerca de su crecimiento, desarrollo y rendimiento en distintos sistemas de producción.

Con el fin de contribuir a generar la información necesaria, en Costa Rica se han invertido gran cantidad de recursos en programas de mejoramiento genético de varias especies forestales para producción comercial, tanto por empresas privadas como instituciones públicas, como el apuntado anteriormente por parte del INISEFOR. El mejoramiento genético es definido como la acción combinada de la genética y la silvicultura para incrementar la productibilidad y calidad del “bosque” [9]; [10], el cual en la actualidad es entendido como cualquier sistema de producción forestal. Su objetivo es obtener árboles que estén más cerca de la condición deseada que aquellos que se utilizan comúnmente [10]. Con la reproducción de esos árboles seleccionados se pretende mejorar el fenotipo de una población; por lo tanto, entre mayor sea la intensidad de selección mayor será también la ganancia genética promedio [11]. No obstante, el éxito del proceso dependerá básicamente de la variabilidad del carácter deseable, su heredabilidad y la proporción de árboles seleccionados; al respecto, tanto [12] como [13] concluyeron que la selección de árboles con características superiores podría ser ineficaz si no se lleva a cabo correctamente, con ganancias cercanas a cero.

Diversos autores han reportado que, mediante la aplicación de la silvicultura clonal sitio – específica, se aumenta significativamente la productividad del sitio, con lo que se contribuye de manera sustancial en la reducción de la brecha entre la oferta y la demanda [7], [14], [15], [16]. En resumen, seleccionar y dar seguimiento a genotipos trae consigo resultados positivos a corto, mediano y largo plazo para los productores a toda escala [17], [18], [7], [16].

Es por lo anterior que el objetivo de la presente investigación fue seleccionar los clones que registren el mejor desempeño en cada una de las condiciones evaluadas, y con ello contribuir al mejoramiento de un paquete de producción forestal sitio – específico para la especie, con el consecuente incremento en los rendimientos por unidad de área y la rentabilización del negocio forestal.

Materiales y métodos

Descripción de los sitios experimentales

Los experimentos de campo se establecieron en dos sitios con condiciones distintas, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los diferentes clones en sistemas de producción agroforestal y sitios diferentes. Los mismos se describen a continuación:

Sitio Venecia: Establecido en el distrito Venecia, cantón San Carlos, provincia Alajuela, Costa Rica, coordenadas

Cuadro 1. Caracterización edafo-climática de los sitios experimentales.

Table 1. Edapho-climatic characterization of the experimental sites.

Parámetros	Sitios experimentales	
	Venecia	Santa Lucía
Altitud (m.s.n.m.)	314	1 230
Topografía	Plana	Ondulada
Pendiente promedio (%)	8	25
Precipitación promedio (mm)	4 200	2 270
Temperatura promedio (°C)	24,5 (desde 24 hasta 26)	20,4 (desde 19,5 hasta 21,4)
Profundidad efectiva (cm)	60	60
Textura	franca-arcillo-arenosa	franco-arenosa
pH	4,2	5,9
Acidez	Alta (1,95)	Baja (0,16)
MO (%)	4,9	14,61
Presencia rocas	Muy baja	Abundante

Fuente: Variables climáticas [19] y edafo-topográficas propia.

geográficas N 10°23,608' y O 84°16,851'; fuera del Gran Área Metropolitana. El terreno había sido utilizado anteriormente para la producción de diversos cultivos agrícolas (camote, yuca, frijoles y maíz entre otros), los cuales se siguieron sembrando en forma de rotación durante el desarrollo del experimento.

Sitio Santa Lucía: Localizado en una finca experimental propiedad de la Universidad Nacional, ubicada en el distrito Santa Lucía, cantón Barva, provincia Heredia, Costa Rica, coordenadas geográficas N 10°1,383' y O 84°6,615'; dentro del Gran Área Metropolitana. El sitio ha sido utilizado por muchos años para la producción de café. Al momento de plantar el ensayo también se renovó el cafetal.

Ninguno de los sitios registró problemas de drenaje. De la misma manera, el contenido de Ca, Mg, K, Cu, P y Fe se presentan dentro de los rangos considerados adecuados para la especie. Cabe destacar que la principal diferencia que se registró entre ellos corresponde a su altitud, y lo que ello implica principalmente en cuanto al clima que impera, además de la presencia de material rocoso (Cuadro 1).

Descripción del diseño experimental

En cada uno de los sitios se estableció un experimento de campo para evaluar el comportamiento de diferentes clones de caoba en cada sistema de producción agroforestal. Los mismos se describen a continuación:

Sitio Venecia: En este experimento se evaluaron 35 clones, seleccionados con base en el comportamiento juvenil de 116 genotipos de un experimento previo establecido en el cantón Guápiles, Provincia Limón. El diseño utilizado fue de Bloques Completos al Azar - BCA, con parcelas de un solo árbol por clon. Se establecieron 19 bloques con 35 clones cada uno y un árbol por genotipo, para un total de 665 individuos evaluados. El espaciamiento inicial fue de 5 m x 5 m, es decir 400 árb*ha⁻¹. El experimento fue evaluado a los 12, 24 y 36 meses de edad.

Sitio Santa Lucía: Aquí se evaluaron 15 clones. Al igual que en el anterior, el diseño utilizado fue de BCA, con parcelas de un solo árbol por clon. Se establecieron 10 bloques con los 15 clones en cada uno, para un total de 150 individuos evaluados. El espaciamiento inicial fue de 8 x 8 m, lo que representa 156 árb*ha⁻¹. Los árboles fueron plantados en la misma línea de siembra del café. Este experimento fue evaluado a los 12, 25 y 37 meses de edad.

En ambos sitios experimentales, el método silvicultural aplicado para el establecimiento y manejo de la caoba fue el recomendado por [3]. El mismo incluye el

control efectivo del barrenador de la familia Meliaceae, *Hypsipyla grandella*.

Variables de la investigación

Para la presente investigación se consideran como variables independientes:

Sitio: la expresión de esta variable puede condicionar los resultados por su interacción con los genotipos inclusive a nivel de micro-sitio [20]. Es por dicha razón que el bloqueo realizado fue con base en las características del área experimental total y, de esa manera, minimizar la variabilidad del sitio dentro de cada bloque, con lo que se anularía su efecto en los resultados obtenidos.

Clones: se evaluaron 35 y 15 genotipos en el primer y segundo sitio experimental, respectivamente. De cada uno de ellos se seleccionaron los superiores para cada sitio, según su desempeño en las variables dependientes. El conjunto clonal evaluado pertenece a la base genética de la especie multiplicada en el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (INISEFOR – UNA).

Por su parte, se seleccionaron como variables dependientes:

DAP (cm): Diámetro Altura de Pecho, medido a 1,3 m de altura desde el suelo en cada árbol, mediante una cinta diamétrica de lona.

Altura Total (m): medida mediante una vara telescópica de 15 m.

Volumen Total: determinado mediante la siguiente ecuación 1.

$$\text{Vol. Tot.} = ((\text{DAP}/100)^2) * 0,7854 * \text{Alt. Tot.} * 0,60 \quad (1)$$

Análisis de la información

Los análisis estadísticos se realizaron mediante el software InfoStat. Para el conjunto clonal establecido en cada sitio se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para datos no balanceados sobre las variables dependientes descritas anteriormente. Se usó como variable de clasificación el clon. Posteriormente se aplicó la prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$) como comparador múltiple, que permitió identificar dónde se encontraban las diferencias significativas entre los clones para cada sitio experimental.

Además, se determinó el porcentaje de superioridad (o inferioridad en caso de ser negativo) en el desempeño de cada clon, comparado con la media poblacional para

las variables dependientes estudiadas. Se ordenaron los clones de cada conjunto genético en forma descendente en cada sitio por separado. De la misma manera, en cuadros y figuras se resaltaron los genotipos que registraron superioridad ($\geq 10\%$) o inferioridad ($\leq -10\%$) sobre la media poblacional con color verde claro o café claro, respectivamente.

Finalmente, con base en la metodología utilizada por [16], para determinar los clones superiores de cada conjunto genético en cada sitio, se establecieron dos niveles de selección:

1) Los genotipos que mostraron una superioridad de 10% sobre la media poblacional, en cuanto al volumen total registrado en la última evaluación, fueron identificados como los candidatos para continuar con su multiplicación y, por ende, utilizarlos en sistemas productivos o proyectos de reforestación comercial.

2) Aquellos que superaron en al menos un 15% la media para la misma variable, y en la última medición registrada, fueron los recomendados tanto para utilizarse en proyectos de producción forestal comercial como para continuar en el proceso de mejoramiento genético, así como posibles cruces para la obtención de individuos mejorados.

El material clonal que no cumpliera con alguno de dichos niveles de selección deberá sacarse de la multiplicación comercial y continuar formando parte de bancos genéticos para otros propósitos a futuro.

Resultados y discusión

Selección de genotipos superiores para el Sitio Venecia

En los cuadros 2, 3 y 4 se presenta la evolución en el tiempo de las variables DAP, altura total y volumen total, respectivamente. Además del porcentaje de superioridad fenotípica, es decir el valor de referencia de cada clon comparado con la media poblacional, y en cada momento de evaluación. Los genotipos que deben seguirse multiplicando, con fines de reforestación comercial y para continuar el programa de mejoramiento genético de la especie, se identificaron a partir de la evaluación esas tres variables principalmente a los 36 meses.

Se registró un crecimiento promedio en DAP para el conjunto clonal de $2,8 \text{ cm}^3 \text{ árbol}^{-1}$, $6,9 \text{ cm}^3 \text{ árbol}^{-1}$ y $9,3 \text{ cm}^3 \text{ árbol}^{-1}$ a los 12, 24 y 36 meses, respectivamente (Cuadro 2). Con base en la última evaluación realizada, se calculó un Incremento Medio Anual (IMA) de $3,1 \text{ cm}^3 \text{ árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Dichos resultados son significativamente superiores a los reportados por [21], en ensayos de progenies y procedencia evaluados en Yucatán, México; donde se presentan condiciones climáticas muy distintas, principalmente en cuanto a la precipitación promedio anual ($1\,000 \text{ mm}$ a $1\,600 \text{ mm}$). De la misma manera, son superiores a los reportados por [6] en Filipinas para la misma especie.

La prueba de medias realizada entre clones sobre la variable DAP reveló que, a medida que avanzan en edad se logran encontrar más diferencias entre genotipos. Es decir, en la evaluación realizada a los 12 meses, estadísticamente hablando, el desempeño de la población es más homogéneo en las varianzas de los clones que la conforman. Lo anterior a pesar que, es en ese momento donde se registra la mayor superioridad de un genotipo sobre el promedio general, el cual es de $35,2\%$ para el clon 96.

Si la selección de genotipos se basara en su desempeño sobre esta variable a los 36 meses, y a partir de los criterios establecidos para tal fin, se identificarían únicamente los clones 3, 98 y 1 como los candidatos a permanecer en el programa de mejoramiento. Además de ellos, los genotipos 78 y 52 serían seleccionados para continuar multiplicándose con fines de reforestación comercial para sitios con características similares a las aquí presentadas.

El desempeño en altura total para el conjunto genético registró un patrón de evolución similar al expresado en DAP. La similitud entre clones es aún más evidente para esta variable, al no obtenerse ninguna diferencia estadísticamente significativa a los 12 ni a los 24 meses (Cuadro 3); es hasta el último momento de evaluación donde se registran pocas diferencias entre genotipos. La selección inicial de estos genotipos se realizó con base en criterios como su altura dominante, lo que explica en gran parte la homogeneidad registrada para dicha variable. A pesar de lo anterior, en la evaluación a los 36 meses se identificó al clon 3 como el único que cumplió con los criterios de selección previamente establecidos. El mismo se ubicó en la tercera y segunda posición antes de finalmente ocupar la primera para altura total, donde registró un IMA de $2,7 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Al respecto, [2] reportó un IMA en altura total, a los mismos tres años, de $0,44 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en un sitio seco de Veracruz, México. De ahí la importancia de probar las colecciones genéticas en distintos ambientes en la búsqueda de genotipos que presenten el mejor desempeño en cada una de ellas.

Producto de la interacción entre las anteriores variables (DAP y altura total), el volumen total presentó un desempeño similar, al mostrar más diferencias estadísticamente significativas entre genotipos conforme

Cuadro 2. Ganancia fenotípica en diámetro altura de pecho para una colección de clones de caoba establecidos en sitio Venecia, Alajuela, Costa Rica.

Table 2. Phenotypic gain in diameter at breast height for a collection of mahogany clones established at site Venecia, Alajuela, Costa Rica.

Clon	DAP 12 meses (cm*árb ⁻¹)		Superioridad (%)	Clon	DAP 24 meses (cm*árb ⁻¹)		Superioridad (%)	Clon	DAP 36 meses (cm*árb ⁻¹)		Superioridad (%)
96	3,8	A	35,2	96	8,1	A	17,6	3	11,1	A	18,7
85	3,3	A B	16,1	3	7,6	A B	10,5	98	10,8	A B	15,9
87	3,2	A B	11,5	115	7,6	A B	10,4	1	10,8	A B	15,5
129	3,1	A B	10,8	78	7,5	A B	8,9	78	10,5	A B C	12,4
84	3,1	A B	10,1	98	7,5	A B	8,3	52	10,3	A B C	10,4
98	3,1	A B	9,4	21	7,4	A B	7,3	5	9,9	A B C	6,3
288	3,1	A B	9,0	207	7,4	A B	7,0	207	9,8	A B C	5,4
52	3,1	A B	8,3	206	7,4	A B	6,3	96	9,8	A B C	4,7
115	3,1	A B	8,0	52	7,3	A B	6,0	73	9,7	A B C	4,4
67	3,0	A B	6,9	85	7,3	A B	5,7	202	9,6	A B C	2,7
21	3,0	A B	6,9	87	7,3	A B C	5,6	132	9,5	A B C	2,3
202	3,0	A B	5,5	202	7,3	A B C	5,0	62	9,5	A B C	2,1
78	2,9	A B	3,7	73	7,2	A B C	4,0	85	9,5	A B C	1,5
72	2,9	A B	3,7	246	7,2	A B C	3,6	121	9,3	A B C	-0,2
182	2,9	A B	3,4	307	7,1	A B C	2,0	87	9,3	A B C	-0,3
207	2,9	A B	2,3	83	7,0	A B C	0,7	206	9,3	A B C	-0,3
62	2,9	A B	2,0	245	7,0	A B C	0,7	21	9,3	A B C	-0,5
183	2,9	A B	0,9	132	6,9	A B C	-0,1	57	9,2	A B C	-1,5
245	2,8	A B	-0,2	1	6,9	A B C	-0,6	83	9,1	A B C	-2,6
307	2,8	A B	-0,2	121	6,8	A B C	-1,5	287	9,1	A B C	-2,8
73	2,7	A B	-3,3	116	6,8	A B C	-1,8	183	9,1	A B C	-2,8
79	2,7	A B	-3,3	67	6,7	A B C	-3,2	129	9,0	A B C	-3,7
13	2,7	A B	-4,4	183	6,7	A B C	-3,4	307	9,0	A B C	-3,8
1	2,7	A B	-5,5	79	6,7	A B C	-3,8	13	9,0	A B C	-3,9
287	2,6	A B	-6,9	288	6,6	A B C	-4,0	79	9,0	A B C	-4,0
83	2,6	A B	-8,0	57	6,6	A B C	-5,1	245	8,9	A B C	-4,9
246	2,6	A B	-9,0	13	6,5	A B C	-5,8	182	8,8	A B C	-5,9
116	2,6	A B	-9,0	72	6,5	A B C	-6,1	246	8,8	A B C	-5,9
3	2,6	A B	-9,7	84	6,5	A B C	-6,3	72	8,7	A B C	-6,3
121	2,5	B	-10,4	62	6,5	A B C	-6,6	115	8,7	A B C	-6,4
57	2,5	B	-10,8	182	6,4	A B C	-7,6	116	8,6	B C	-7,3
206	2,5	B	-11,5	129	6,3	A B C	-8,7	67	8,5	B C	-8,6
132	2,4	B	-14,7	287	6,2	A B C	-10,2	84	8,5	B C	-8,8
4	2,2	B	-20,7	5	6,1	B C	-12,4	288	8,3	C	-10,5
5	2,1	B	-26,4	4	5,4	C	-22,2	4	8,3	C	-11,1
Promedio	2,8				6,9				9,3		

Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0,05$). Se resaltan los genotipos que registraron superioridad ($\geq 10\%$) o inferioridad ($\leq -10\%$) sobre la media poblacional.

avanzaba su edad (Cuadro 4). Al respecto, los clones 3, 98, 1, 78, 52 y 5 fueron seleccionados finalmente para continuar en el proceso de mejoramiento genético, producto de su desempeño en el Sitio Venecia. Al

respecto, [16] concluyen que las condiciones del sitio les permiten a los clones seleccionados expresar gran parte del potencial genético que tienen. Esa expresión los convierten en candidatos para el cruzamiento sexual

Cuadro 3. Ganancia fenotípica en altura total para una colección de clones de caoba establecidos en sitio Venecia, Alajuela, Costa Rica.

Table 3. Phenotypic gain in total height for a collection of mahogany clones established at site Venecia, Alajuela, Costa Rica.

Clon	Alt. Tot. 12 meses (m*árb ⁻¹)	Superioridad (%)	Clon	Alt. Tot. 24 meses (m*árb ⁻¹)	Superioridad (%)	Clon	Alt. Tot. 36 meses (m*árb ⁻¹)	Superioridad (%)			
96	2,71	A	16,0	98	6,19	A	8,9	3	8,09	A	15,4
85	2,70	A	15,6	3	6,19	A	8,9	1	7,53	A B	7,4
3	2,68	A	14,7	115	6,17	A	8,6	115	7,51	A B	7,2
245	2,63	A	12,6	78	6,16	A	8,4	98	7,45	A B	6,3
288	2,62	A	12,1	116	6,13	A	7,9	5	7,39	A B	5,5
1	2,58	A	10,4	245	6,10	A	7,4	121	7,33	A B	4,6
52	2,57	A	10,0	207	6,07	A	6,8	78	7,31	A B	4,3
115	2,53	A	8,3	246	6,06	A	6,7	207	7,29	A B	4,0
84	2,53	A	8,3	79	5,93	A	4,4	116	7,24	A B	3,3
246	2,48	A	6,2	1	5,92	A	4,2	79	7,24	A B	3,3
87	2,48	A	6,2	121	5,90	A	3,8	245	7,23	A B	3,2
98	2,47	A	5,7	52	5,87	A	3,3	52	7,19	A B	2,6
121	2,43	A	4,0	5	5,83	A	2,6	129	7,15	A B	2,0
207	2,41	A	3,2	13	5,80	A	2,1	246	7,14	A B	1,9
202	2,39	A	2,3	85	5,79	A	1,9	4	7,10	A B	1,3
5	2,37	A	1,4	84	5,68	A	0,0	73	7,05	A B	0,6
67	2,34	A	0,2	206	5,67	A	-0,2	202	7,05	A B	0,6
116	2,33	A	-0,3	21	5,65	A	-0,6	84	7,00	A B	-0,1
4	2,31	A	-1,1	67	5,61	A	-1,3	87	6,98	A B	-0,4
78	2,31	A	-1,1	73	5,57	A	-2,0	13	6,92	A B	-1,3
206	2,30	A	-1,6	202	5,54	A	-2,5	85	6,89	A B	-1,7
21	2,28	A	-2,4	132	5,51	A	-3,0	287	6,88	A B	-1,8
182	2,27	A	-2,8	4	5,48	A	-3,6	132	6,82	B	-2,7
79	2,25	A	-3,7	182	5,48	A	-3,6	206	6,80	B	-3,0
62	2,20	A	-5,8	87	5,47	A	-3,7	182	6,78	B	-3,3
13	2,17	A	-7,1	307	5,46	A	-3,9	307	6,76	B	-3,5
83	2,16	A	-7,5	96	5,43	A	-4,4	288	6,75	B	-3,7
129	2,16	A	-7,5	288	5,41	A	-4,8	83	6,73	B	-4,0
57	2,11	A	-9,7	57	5,36	A	-5,7	67	6,67	B	-4,8
73	2,09	A	-10,5	287	5,30	A	-6,7	21	6,67	B	-4,8
72	2,09	A	-10,5	62	5,29	A	-6,9	57	6,54	B	-6,7
183	2,06	A	-11,8	83	5,28	A	-7,1	62	6,54	B	-6,7
287	1,99	A	-14,8	129	5,23	A	-8,0	96	6,52	B	-7,0
307	1,96	A	-16,1	72	5,18	A	-8,8	183	6,44	B	-8,1
132	1,81	A	-22,5	183	5,15	A	-9,4	72	6,30	B	-10,1
Promedio	2,34				5,68				7,01		

Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas (α=0,05). Se resaltan los genotipos que registraron superioridad (≥ 10 %) o inferioridad (≤ -10 %) sobre la media poblacional.

[14], con otros que, de la misma manera, hayan sido seleccionados por sus características superiores ya sea dentro o fuera de Costa Rica, con el objetivo final de enriquecer las bases genéticas [22]. Adicionalmente

a ellos, el 207 también se identificó como candidato a multiplicarse para ser utilizado en sistemas de producción forestal comercial.

Cuadro 4. Ganancia fenotípica en el volumen total para una colección de clones de caoba establecidos en sitio Venecia, Alajuela, Costa Rica.

Table 4. Phenotypic gain in total volume for a collection of mahogany clones established at site Venecia, Alajuela, Costa Rica.

Clon	Volumen Total 12 meses (m ³ *árb ⁻¹)	Superioridad (%)	Clon	Volumen Total 24 meses (m ³ *árb ⁻¹)	Superioridad (%)	Clon	Volumen Total 36 meses (m ³ *árb ⁻¹)	Superioridad (%)
96	0,0027 A	116,2	96	0,0191 A	34,1	3	0,0473 A	52,9
85	0,0019 A B	52,2	115	0,0182 A B	27,8	98	0,0433 A B	39,9
84	0,0016 A B	28,1	98	0,0179 A B	25,7	1	0,0423 A B C	36,7
288	0,0016 A B	28,1	3	0,0174 A B	22,2	78	0,0384 A B C D	24,1
98	0,0016 A B	28,1	78	0,017 A B	19,4	52	0,0380 A B C D	22,8
129	0,0015 A B	20,1	207	0,0163 A B C	14,4	5	0,0356 A B C D	15,1
67	0,0015 A B	20,1	87	0,0162 A B C	13,7	207	0,0346 A B C D	11,8
52	0,0015 A B	20,1	85	0,0157 A B C	10,2	73	0,0331 A B C D	7,0
115	0,0015 A B	20,1	52	0,0157 A B C	10,2	96	0,0322 A B C D	4,1
87	0,0015 A B	20,1	246	0,0154 A B C	8,1	202	0,0317 A B C D	2,5
78	0,0013 A B	4,1	21	0,0154 A B C	8,1	87	0,0317 A B C D	2,5
21	0,0013 A B	4,1	206	0,0153 A B C	7,4	85	0,0313 A B C D	1,2
245	0,0013 A B	4,1	245	0,0151 A B C	6,0	121	0,0305 B C D	-1,4
182	0,0013 A B	4,1	202	0,0146 A B C	2,5	79	0,0300 B C D	-3,0
79	0,0013 A B	4,1	307	0,0144 A B C	1,1	132	0,0298 B C D	-3,7
62	0,0013 A B	4,1	116	0,0144 A B C	1,1	287	0,0297 B C D	-4,0
207	0,0013 A B	4,1	73	0,0143 A B C	0,4	183	0,0297 B C D	-4,0
202	0,0012 A B	-3,9	183	0,0142 A B C	-0,3	115	0,0295 B C D	-4,7
307	0,0012 A B	-3,9	79	0,0141 A B C	-1,0	62	0,0293 B C D	-5,3
72	0,0012 A B	-3,9	83	0,0137 A B C	-3,8	129	0,0288 B C D	-6,9
183	0,0011 B	-11,9	1	0,0137 A B C	-3,8	206	0,0287 B C D	-7,2
1	0,0011 B	-11,9	121	0,0135 A B C	-5,2	182	0,0287 B C D	-7,2
287	0,0011 B	-11,9	288	0,0133 A B C	-6,6	13	0,0283 B C D	-8,5
3	0,0011 B	-11,9	84	0,0132 A B C	-7,3	245	0,0280 B C D	-9,5
83	0,0010 B	-19,9	67	0,013 A B C	-8,7	21	0,0279 B C D	-9,8
13	0,0010 B	-19,9	132	0,0128 A B C	-10,1	307	0,0279 B C D	-9,8
246	0,0010 B	-19,9	13	0,0127 A B C	-10,8	57	0,0277 B C D	-10,5
116	0,0010 B	-19,9	129	0,0126 A B C	-11,5	83	0,0275 B C D	-11,1
73	0,0009 B	-27,9	182	0,0125 A B C	-12,2	246	0,0267 B C D	-13,7
121	0,0009 B	-27,9	287	0,0121 A B C	-15,0	116	0,0264 C D	-14,7
132	0,0009 B	-27,9	57	0,0121 A B C	-15,0	4	0,0262 C D	-15,3
57	0,0008 B	-35,9	72	0,012 A B C	-15,7	72	0,0260 C D	-16,0
4	0,0008 B	-35,9	62	0,0115 A B C	-19,3	288	0,0258 C D	-16,6
206	0,0008 B	-35,9	5	0,0106 B C	-25,6	84	0,0257 C D	-16,9
5	0,0006 B	-51,9	4	0,0085 C	-40,3	67	0,0246 D	-20,5
Promedio	0,0012			0,0142			0,0309	

Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0,05$). Se resaltan los genotipos que registraron superioridad ($\geq 10\%$) o inferioridad ($\leq -10\%$) sobre la media poblacional.

Resulta importante rescatar que, los clones 1 y 5 no ocupaban las primeras posiciones a los 12 y 24 meses; caso contrario de genotipos como por ejemplo 96, 85 y 115, que estuvieron dentro de los seleccionables en las primeras mediciones, pero no en el momento definitivo

para tal fin. Dicha situación refuerza la necesidad de estudiar la evolución en el tiempo de distintas variables de crecimiento, antes de tomar la decisión final de la edad de selección.

Si se utilizaran únicamente los clones seleccionados, el volumen promedio que se obtendría a los 36 meses sería de 0,0399 m³*árb⁻¹, es decir una superioridad promedio de 29,1 % sobre todo el conjunto genético. Utilizar solamente dichos clones representaría un volumen total de aproximadamente 16 m³*ha⁻¹ a los 37 meses de edad, si se establecieran a 400 árb*ha⁻¹ en sistemas agroforestales (SAF) con cultivos de ciclo corto, o 25 m³*ha⁻¹ en el caso de SAF con cacao (625 árb*ha⁻¹). [11] apunta que, mediante la utilización únicamente de los árboles seleccionados se pretende mejorar el fenotipo de una población, es decir entre mayor sea la intensidad y rigurosidad de la selección, mayor será también la ganancia genética promedio. En caso contrario se podrían obtener incluso “ganancias negativas” [12], es decir menor crecimiento de ciertos genotipos con respecto a la media poblacional.

Los restantes clones deberían descartarse para reforestación comercial [23] y conservarse en bancos de germoplasma para objetivos futuros [16], [6], [24]. Situación similar reportó [7], quien seleccionó dos clones de caoba de un conjunto genético de 11 en total; sin embargo, adicionalmente recomendó tomar en cuenta un tercero por presentar valores muy cercanos a los dos seleccionados.

En la figura 1 se aprecia, de manera gráfica, el desempeño de todo el conjunto genético con respecto al volumen total a los 36 meses de edad. La línea paralela

al eje “X” representa el promedio poblacional en cuanto a dicha variable.

Se identificaron clones con una significativa amplitud en sus resultados, es decir, con amplias diferencias entre sus valores mínimos y máximos, como por ejemplo 96, 182 y 183; al respecto [2] reportó un patrón similar en cuanto a la dispersión de sus valores. Estos clones no deberían ser seleccionados porque podrían tener un desempeño en campo tanto alto como bajo, debido al patrón mostrado en volumen total. Por su parte, se identificaron genotipos con varianza pequeña, como el 132 y 206, los cuales se ubicaron en las posiciones intermedias en la jerarquización realizada a partir del volumen total, por lo que tampoco deberían ser seleccionados. [24] apunta que un coeficiente de variación alto sugiere un enorme potencial de mejoramiento genético.

Se aprecia muy fácil y rápidamente que la media de los clones seleccionados como superiores, según los parámetros establecidos, está por encima del promedio poblacional; además de los genotipos cuya media está por debajo de la general (Figura 1). Este simple gráfico brinda una primera idea de los clones que deberían o no ser seleccionados como superiores, para sitios con características similares a este.

Debe existir un alto grado de rigurosidad en la utilización únicamente de los clones identificados como superiores. Al respecto [25] apuntan que el éxito de los programas de

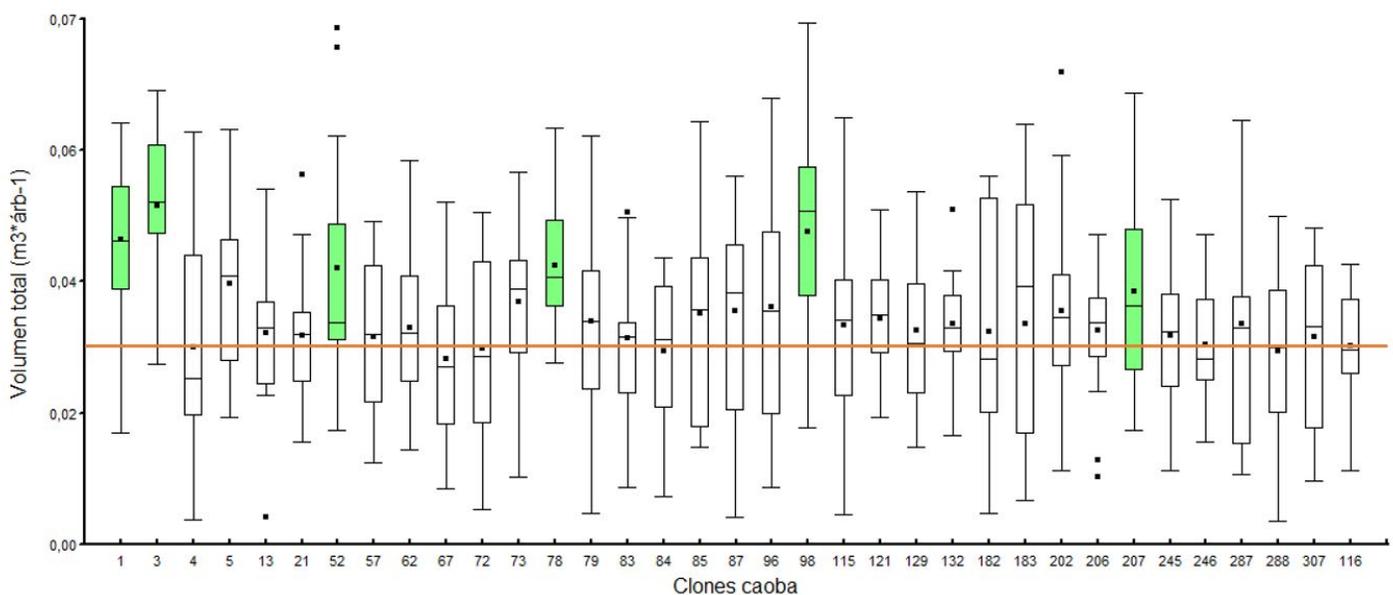


Figura 1. Selección de genotipos de caoba del conjunto genético clonal en sitio Venecia.

Figure 1. Mahogany genotype selection of the clonal genetic set at site Venecia.

Las barras color verde corresponde a los genotipos identificados como los que deben continuar el proceso de mejoramiento genético para las condiciones de este sitio.

mejoramiento se determina por la calidad de los árboles seleccionados y la ganancia genética. Es por lo anterior que en la presente investigación se determinaron dos niveles de selección, ambos considerados rigurosos a partir de la media poblacional. Al respecto, en la figura 2 se presenta la posición de los genotipos para las tres variables evaluadas, únicamente a los 36 meses de edad.

A los 36 meses de edad, el clon 3 no solamente estuvo ubicado en las primeras posiciones para las tres variables evaluadas, sino que además, cumplió en todas ellas con los criterios establecidos para ser seleccionado por su desempeño con respecto a la media poblacional. Otros genotipos, como el 98, 1, 78 y 52, no cumplieron con los criterios de selección en altura total, principalmente debido a la homogeneidad reportada para dicha variable en todo el conjunto clonal (Cuadro 3). Adicionalmente se identificaron como superiores los clones 5 y 207, a pesar de no haber cumplido con los requisitos de selección para DAP ni altura total; no obstante, la sinergia creada entre dichas variables les llevó a ser seleccionados por su desempeño en volumen total.

De la misma manera pero en menor medida, se registraron clones ubicados en las últimas posiciones para las tres variables, como por ejemplo 72, 67 y 288. Dicho patrón también demuestra consistencia en su desempeño, no obstante hacia la baja en todas las variables. [7] también reportó un patrón de consistencia en el tiempo para algunos genotipos.

Adicionalmente, se registraron genotipos con desempeño notable en alguna de las variables y desalentador en otras. El 115, 96, 116, 132 y 62 son ejemplos de lo anterior. Dicho comportamiento heterogéneo entre variables los convierten en posibles candidatos a cruces controlados, con lo que en la siguiente generación se pudiese rescatar su buen desempeño en determinada (s) variable (s).

Selección de genotipos superiores para el Sitio Santa Lucía

De la misma manera que en el Sitio Venecia, a continuación se presenta la evolución en el tiempo para las variables DAP, altura total y volumen total para el Sitio Santa Lucía (Cuadros 5, 6 y 7). La selección final de los genotipos se realizó a partir de la evaluación de los tres parámetros a los 37 meses.

Las condiciones propias del sitio Santa Lucía no le permitieron expresar el potencial genético que tiene el conjunto clonal evaluado. Lo anterior se infiere del hecho que no se registraran valores de DAP a los 12 meses de edad, como sí sucedió en el Sitio Venecia. Se obtuvo un crecimiento promedio en DAP para el

conjunto clonal de 4,1 cm*árb⁻¹ y 5,4 cm*árb⁻¹ a los 25 y 37 meses, respectivamente (Cuadro 5). Con base en la evaluación realizada a los 37 meses, se calcula un IMA de 1,8 cm*árb⁻¹*año⁻¹; el cual es un 58 % menor que el registrado en Venecia.

Aunado a lo anterior, en este sitio se registró un patrón contrario al primero, en cuanto a las diferencias expresadas en la prueba de medias conforme avanza en edad el conjunto clonal. En la evaluación realizada a los 37 meses, se registró menor cantidad de diferencias

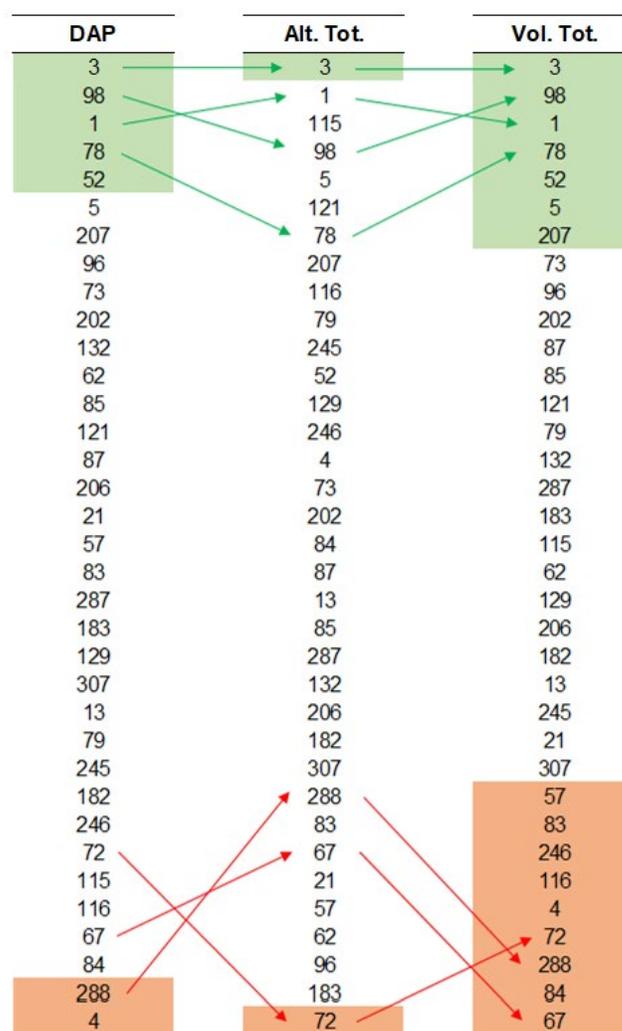


Figure 2. Jerarquización descendente de los clones evaluados en cuanto a DAP, altura total y volumen total a los 36 meses de edad, sitio Venecia.

Figure 2. Downward hierarchy of the clones evaluated in terms of dbh, total height and total volume at 36 months of age, at site Venecia.

Se resaltan los genotipos que registraron superioridad (≥ 10 %) o inferioridad (≤ -10 %) sobre la media poblacional con color verde claro o café claro, respectivamente.

Cuadro 5 Ganancia fenotípica en diámetro altura de pecho para una colección de clones de caoba establecidos en sitio Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.

Table 5. Phenotypic gain in diameter at breast height for a collection of mahogany clones established at site Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.

Clon	DAP 25 meses (cm*árb ⁻¹)			Superioridad fenotípica (%)	Clon	DAP 37 meses (cm*árb ⁻¹)			Superioridad fenotípica (%)
96	5,1	A		26,0	96	6,6	A		21,1
21	4,8	A B		17,9	21	6,2	A		14,4
57	4,4	A B C		8,3	57	6,1	A		11,7
87	4,4	A B C		7,4	206	5,7	A B		5,1
206	4,3	A B C		4,9	202	5,7	A B		4,7
83	4,2	A B C		2,7	74	5,7	A B		4,5
74	4,1	A B C		0,2	87	5,5	A B		0,5
79	4,0	A B C		-1,0	83	5,5	A B		0,3
202	4,0	A B C		-1,0	33	5,4	A B		-0,4
33	3,9	A B C		-3,5	67	5,4	A B		-1,2
67	3,9	A B C		-3,5	80	5,2	A B		-4,1
80	3,9	A B C		-5,2	79	5,2	A B		-5,2
84	3,7	A B C		-9,1	84	5,0	A B		-8,3
182	3,4	B C		-17,5	182	4,6	A B		-15,0
13	3,0	C		-26,8	13	3,9	B		-28,0
Promedio	4,1					5,4			

Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas (α=0,05). Se resaltan los genotipos que registraron superioridad (≥ 10 %) o inferioridad (≤ -10 %) sobre la media poblacional.

Cuadro 6. Ganancia fenotípica en altura total para una colección de clones de caoba establecidos en sitio Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.

Table 6. Phenotypic gain in total height for a collection of mahogany clones established at site Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.

Clon	Alt. Tot. 12 meses (m*árb ⁻¹)			Superioridad fenotípica (%)	Clon	Alt. Tot. 25 meses (m*árb ⁻¹)			Superioridad fenotípica (%)	Clon	Alt. Tot. 37 meses (m*árb ⁻¹)			Superioridad fenotípica (%)
21	1,81	A		49,3	21	4,10	A		19,8	74	4,87	A		11,8
96	1,50	A B		23,7	96	4,04	A		18,0	21	4,83	A		10,9
182	1,40	A B		15,4	87	3,70	A		8,1	96	4,79	A		10,0
84	1,29	A B		6,4	57	3,64	A		6,3	57	4,67	A		7,2
206	1,28	A B		5,6	79	3,63	A		6,1	87	4,58	A		5,1
79	1,24	A B		2,3	206	3,49	A		2,0	79	4,56	A		4,7
13	1,19	A B		-1,9	74	3,46	A		1,1	80	4,33	A		-0,6
83	1,19	A B		-1,9	83	3,42	A		-0,1	182	4,33	A		-0,6
87	1,18	A B		-2,7	182	3,34	A		-2,4	206	4,32	A		-0,8
74	1,14	A B		-6,0	33	3,23	A		-5,6	83	4,27	A		-2,0
33	1,07	A B		-11,8	80	3,20	A		-6,5	67	4,23	A		-2,9
67	1,06	A B		-12,6	84	3,18	A		-7,1	202	4,13	A		-5,2
80	1,01	A B		-16,7	67	3,16	A		-7,7	84	4,06	A		-6,8
57	1,00	A B		-17,5	13	3,09	A		-9,7	33	3,83	A		-12,1
202	0,83	B		-31,6	202	2,66	A		-22,3	13	3,54	A		-18,7
Promedio	1,21					3,42					4,36			

Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas (α=0,05). Se resaltan los genotipos que registraron superioridad (≥ 10 %) o inferioridad (≤ -10 %) sobre la media poblacional.

Cuadro 7. Ganancia fenotípica en volumen total para una colección de clones de caoba establecidos en sitio Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.**Table 7.** Phenotypic gain in total volume for a collection of mahogany clones established at site Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.

Clon	Volumen Total 25 meses (m ³ *árb-1)	Superioridad fenotípica (%)	Clon	Volumen Total 37 meses (m ³ *árb-1)	Superioridad fenotípica (%)		
96	0,0054	A	78,4	96	0,0106	A	60,4
21	0,0045	A B	48,7	21	0,0091	A B	37,7
57	0,0037	A B	22,2	57	0,0085	A B	28,7
87	0,0035	A B	15,6	74	0,0075	A B	13,5
206	0,0032	A B	5,7	202	0,0067	A B	1,4
79	0,0031	A B	2,4	87	0,0067	A B	1,4
83	0,0030	A B	-0,9	83	0,0064	A B	-3,1
74	0,0030	A B	-0,9	206	0,0063	A B	-4,6
67	0,0026	A B	-14,1	79	0,0063	A B	-4,6
182	0,0025	A B	-17,4	67	0,0062	A B	-6,2
202	0,0025	A B	-17,4	80	0,0059	A B	-10,7
80	0,0024	A B	-20,7	182	0,0054	A B	-18,3
33	0,0024	A B	-20,7	33	0,0054	A B	-18,3
84	0,0023	A B	-24,0	84	0,0053	A B	-19,8
13	0,0013	B	-57,0	13	0,0028	B	-57,6
Promedio	0,0030				0,0066		

Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0,05$). Se resaltan los genotipos que registraron superioridad ($\geq 10\%$) o inferioridad ($\leq -10\%$) sobre la media poblacional.

estadísticamente significativas que las obtenidas a los 25 meses entre clones para DAP y las mismas para volumen total. En el caso de la altura total se registraron las mismas diferencias entre los 25 y 37 meses de edad, las cuales fueron menores que las obtenidas a los 12 meses de establecido el ensayo clonal. De lo anterior se intuye que las condiciones edafo – climáticas en este sitio, aunadas a la altitud, homogenizaron hasta cierto punto el desempeño de los genotipos, impidiendo la obtención de mayores diferencias estadísticas entre clones. Además, posiblemente también contribuyó a este resultado el menor número de clones evaluados en este sitio.

Lo anterior también se aprecia en el porcentaje de superioridad fenotípica de cada uno de los clones. En cuanto al volumen total, el clon 96 pasó de tener un 78,4 % a un 60,4 % superior a la media entre las evaluaciones de 25 y 37 meses; es decir disminuyó considerablemente (Cuadro 7).

La altura total registró un patrón homogéneo entre clones, al no obtenerse ninguna diferencia estadísticamente significativa entre ellos ni a los 25 ni a los 37 meses (Cuadro 6). A pesar de lo anterior, se identificaron los clones 21 y 96 en las tres primeras posiciones, superiores sobre la media poblacional en todas las evaluaciones. El clon 74 fue el que registró la mayor altura a los 37 meses con 4,87 m*árb⁻¹. Esto representa un IMA de 1,6

m*árb⁻¹*año⁻¹, en contraposición de los 2,7 cm*árb⁻¹*año⁻¹ registrados en Venecia, es decir, una reducción del 59 % principalmente debido a las condiciones propias del lugar.

A pesar de la acumulación de ganancias en altura y diámetro para algunos de los genotipos evaluados, y la interacción entre ambas, el volumen total presentó la misma cantidad de diferencias estadísticamente significativas tanto a los 25 como a los 37 meses. No obstante, al basar la selección de genotipos sobre esta variable a los 37 meses, y a partir de los criterios establecidos para tal fin, se identificaron únicamente los clones 96, 21 y 57 como los candidatos a permanecer en el programa de mejoramiento. Además de estos, el 74 también fue seleccionado para continuar multiplicándolo con fines de reforestación comercial para sitios con características similares a las de Santa Lucía de Barva en Heredia. Resulta necesario probar una cantidad de clones mayor a la colección de 15 establecida en este sitio, como por ejemplo los 35 genotipos evaluados en el Sitio Venecia, con el objetivo de ampliar las alternativas de selección. Al respecto [25] mencionan que, la persona genetista o silvicultora no puede manipular la heredabilidad, pero puede incrementar el diferencial de selección y obtener grandes ganancias al trabajar con la variabilidad fenotípica y la intensidad de selección.

Si se utilizaran únicamente los clones seleccionados, el volumen promedio a los 37 meses sería de 0,0089 m³*árb⁻¹, es decir un 34,8 % superior a todo el conjunto genético. Lo anterior representa un volumen total de 3,6 m³*ha⁻¹ si se establecieran en SAF con cultivos de ciclo corto, o 5,6 m³*ha⁻¹ en el caso de SAF con cacao. El objetivo final de establecer únicamente los clones seleccionados es producir una nueva población de árboles con mejores características en cantidad y calidad de volumen, tanto total como comercial [26], [25]. Esto es especialmente importante para sitios como Santa Lucía, donde no existe una amplia gama de alternativas de especies comprobadas como superiores.

Estas proyecciones para Santa Lucía son significativamente inferiores a las aquí reportadas para Venecia. Resulta difícil realizar una comparación entre sitios al no estar presente la misma colección genética en ambos (pero podrían compararse los clones comunes a ambos sitios). Además de ello, debido a las condiciones climáticas en el segundo sitio, el crecimiento es casi continuo durante todo el año, mientras que en Santa Lucía se presentan entre 5 y 6 meses de época seca durante el año. De esta forma, el número anual de meses efectivos de crecimiento de los árboles es casi la mitad en Santa Lucía con respecto a Venecia. Por otra parte, la temperatura promedio en Venecia es 24,5 °C, mientras que en Santa Lucía es 4 grados menor (20,4 °C). Ambos factores, junto con la diferencia en altitud,

marcan el crecimiento diferenciado, a pesar que no se pueda separar el efecto que tiene sobre los clones de cada una de esas variables [21], [6]. [21] concluyeron que una alta presencia de piedras y menor precipitación produjo un crecimiento diferenciado entre sitios, con progenies y procedencias de caoba, tal como sugieren los resultados obtenidos en la presente investigación. Los mismos autores apuntan que la estrategia debería ser utilizar el mejor germoplasma identificado, tanto para los sitios de alta como de baja calidad [6], [21]. No obstante, la identificación de esos genotipos no sería suficiente de no estar acompañados de una silvicultura adecuada, adaptada a las condiciones del sitio [6] y al producto final planeado.

No se registró una consistencia en cuanto a los mejores clones entre sitios, lo que significa sitio – especificidad del material genético evaluado. El mismo patrón también fue reportado por [16]. Lo anterior a excepción del clon 96, que registró el mejor desempeño en volumen total para el Sitio Santa Lucía y además se ubicó en la posición 9 (de 35 genotipos) en el Sitio Venecia. Lo anterior da mayor confianza para utilizarlo en sistemas agroforestales en ambas condiciones de sitio y similares. De la misma manera a los resultados obtenidos en la presente investigación, autores como [21] reportaron haber encontrado diferencias estadísticamente significativas entre el material genético evaluado sólo para algunas de las variables estudiadas.

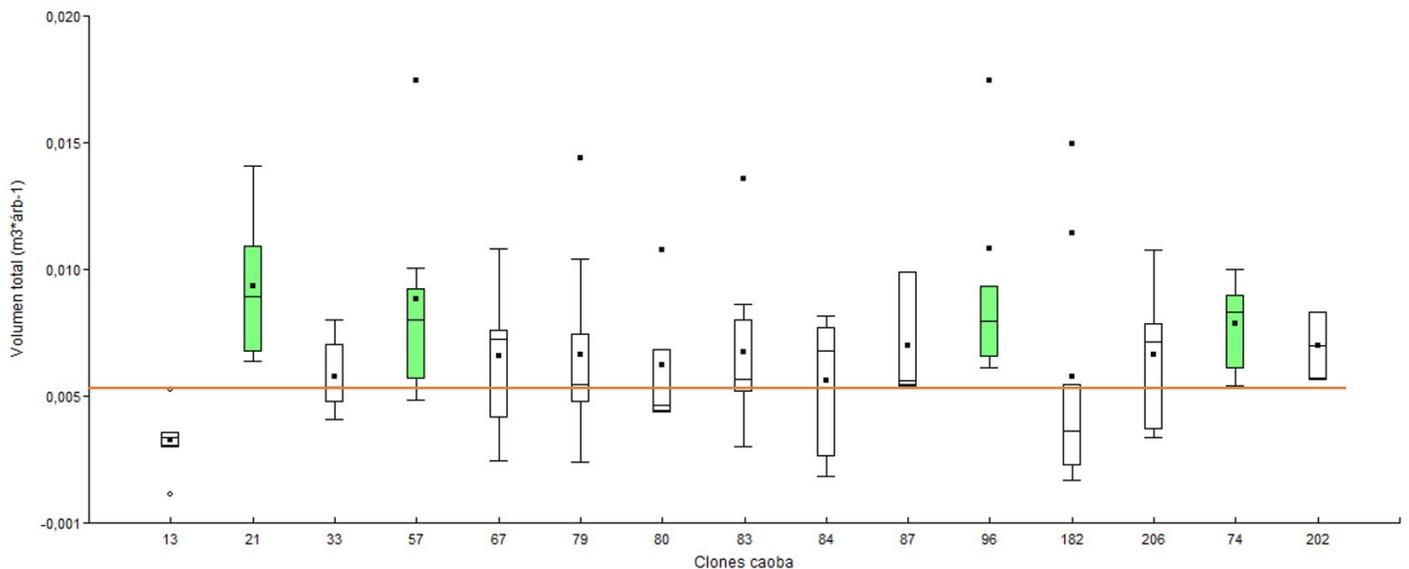


Figura 3. Selección de genotipos de caoba del conjunto genético clonal en sitio Santa Lucía.

Figure 3. Mahogany genotype selection of the clonal genetic set at site Santa Lucía.

Las barras color verde corresponde a los genotipos identificados como los que deben continuar el proceso de mejoramiento genético para las condiciones de este sitio.

Al igual que lo recomendado para el Sitio Venecia, los clones no seleccionados, acorde con estos criterios, deberían descartarse para reforestación comercial para este tipo de sitios y conservarse en bancos de germoplasma para objetivos futuros [23]. Lo anterior además debe contribuir a evitar el empobrecimiento genético, vital para la adaptación y cambios evolutivos de la especie [2], es decir la diversidad genética como estrategia de conservación. También porque dos sitios es muy poco para descartar clones; podría ser que en otros sitios los clones que destaquen sean distintos a los que destacaron en este trabajo.

En la figura 3 se aprecia, de manera gráfica, el desempeño de todo el conjunto genético con respecto al volumen total a los 37 meses de edad. La línea paralela al eje "X" representa el promedio poblacional en cuanto a dicha variable.

Se aprecia, incluso más claramente que en el Sitio Venecia, que la amplitud de los datos de los clones seleccionados como superiores se encuentra sobre la media poblacional. De esta manera más gráfica ya se tendría una idea clara de los genotipos que deberían o no ser seleccionados como superiores, para sitios con características similares a este. Al respecto, a partir de la anterior figura se logra identificar clones que no deberían ser seleccionados por la amplitud de la varianza en cuanto al volumen total. Dos evidentes ejemplos son el 84 y 206, los que registraron valores tanto superiores como inferiores de la media poblacional, lo que denota una extrema sensibilidad de su desempeño por factores incluso a nivel de micro sitio. Autores como [2] también reportaron genotipos con el 50 % de sus valores por arriba de la media general y una mayor dispersión en sus datos.

Se debe ser muy riguroso en la utilización únicamente de los clones claramente identificados como fenotípica o genotípicamente superiores, es decir los élite [14], [27]; de esta manera se captura el potencial del árbol deseado [26]. La metodología aquí empleada para la selección de clones superiores, basada en dos niveles de selección, le permitirían a la persona genetista o silvicultora definir con cuánta rigurosidad finalmente desea actuar.

Al respecto, en la figura 4 se presenta la posición que obtuvieron los genotipos para las tres variables evaluadas, a los 37 meses de edad.

Los clones 96, 21 y 57 se ubicaron en las primeras posiciones, a los 37 meses de edad, para las tres variables evaluadas; pero además cumplieron en todas ellas con los criterios establecidos para ser seleccionados por su desempeño. Con respecto al número 74, a pesar de no cumplir con los requisitos en DAP, su desempeño en altura total lo potencia para ser

seleccionado como superior en volumen total junto con los tres genotipos anteriores.

Por su parte, se registró cierto nivel de estabilidad en los clones ubicados en las últimas posiciones para las tres variables. Resaltan los casos de los genotipos 84 y 13, y en menor medida el 67 y 82. Dicho patrón registrado facilita descartar cierto material genético para los siguientes pasos del proceso de mejoramiento genético, lo que no implica deshacerse del mismo como se apuntó en el caso del Sitio Venecia. Incluso en las posiciones intermedias también se registró cierto nivel de estabilidad de los genotipos presentes en ellas para las tres variables evaluadas, es decir sin cambios abruptos.

Los resultados obtenidos de ambos ensayos clonales sugieren la necesidad de una mejor comprensión sobre aspectos como la idoneidad y/o plasticidad de esta especie para diferentes calidades de sitio, objetivos finales del sistema de producción y técnicas de manejo silvícola adecuadas acorde al sitio. Adicionalmente, la variabilidad en el desempeño de los clones dentro y entre sitios indica el potencial para mayor mejora genética.

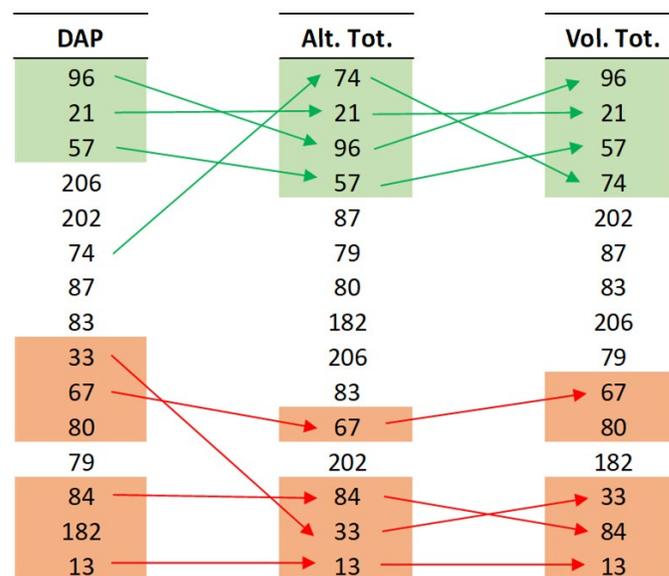


Figura 4. Jerarquización descendente de los clones evaluados en cuanto a DAP, altura total y volumen total a los 37 meses de edad, sitio Santa Lucía.

Figure 4. Downward hierarchy of the clones evaluated in terms of dbh, total height and total volume at 37 months of age, at site Santa Lucía.

Se resaltan los genotipos que registraron superioridad ($\geq 10\%$) o inferioridad ($\leq -10\%$) sobre la media poblacional con color verde claro o café claro, respectivamente.

Conclusiones y recomendaciones

En el Sitio Venecia se registró un crecimiento promedio en DAP para el conjunto clonal de $2,8 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1}$, $6,9 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1}$ y $9,3 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1}$ a los 12, 24 y 36 meses, respectivamente; lo que representa un IMA de $3,1 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 36 meses.

Los clones 3, 98, 1, 78, 52 y 5 fueron identificados para continuar en el proceso de mejoramiento genético, producto de su desempeño en volumen total a los 36 meses en el Sitio Venecia. Adicionalmente a estos, el 207 fue seleccionado para multiplicación para ser utilizado en sistemas de producción forestal comercial.

Si se utilizaran únicamente los clones seleccionados, el volumen promedio a los 36 meses sería de $0,0399 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$ en condiciones similares al Sitio Venecia.

Las condiciones propias del sitio Santa Lucía no le permitieron expresar el potencial genético que tiene el conjunto clonal evaluado. Se obtuvo un crecimiento promedio en DAP para el conjunto clonal de $4,1 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1}$ y $5,4 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1}$ a los 25 y 37 meses, respectivamente; lo que representa un IMA de $1,8 \text{ cm}^2 \text{ árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Este es un 58 % menor que el registrado en Sitio Venecia.

Para Sitio Santa Lucía se identificaron los clones 96, 21 y 57 como los candidatos a permanecer en el programa de mejoramiento. Además, el 74 fue seleccionado para multiplicación con fines de reforestación comercial.

Los restantes clones deberían descartarse para reforestación comercial, pero conservarse en bancos de germoplasma para objetivos futuros.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento para con los revisores externos de la revista, quienes brindaron observaciones muy valiosas para mejorar este manuscrito.

Referencias

- [1] O. Corella, «Valoración de la base forestal de plantaciones forestales y su contribución al abastecimiento de madera en la zona del Atlántico Norte de Costa Rica,» CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2009.
- [2] J. Bernabé, «Evaluación de un ensayo de procedencias/progenie de *Swietenia macrophylla* King establecido en La Balsa, Veracruz,» Universidad Veracruzana, Veracruz, México, 2018.
- [3] E. Corea y O. Chinchilla, «El cultivo de caoba (*Swietenia macrophylla*) en los primeros cuatro años de crecimiento, Costa Rica,» Universidad nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica, 2015.
- [4] O. Chinchilla, E. Corea y V. Meza, «Silvicultura de clones superiores de caoba (*Swietenia macrophylla*) en los primeros cuatro años de crecimiento, Costa Rica,» Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2018.
- [5] M. Navarro, «Diagnóstico del estado actual de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en los bosques manejados de Quintana Roo, México: perspectivas para su manejo,» Universidad Veracruzana, Veracruz, México, 2015.
- [6] A. Abarquez, D. Bush, J. Ata, J. EL Tolentino y D. Gilbero, «Early growth and genetic variation of Mahogany (*Swietenia macrophylla*) in progeny tests planted in Northern Mindanao, Philippines,» *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 27, n° 3, pp. 314-324, 2015.
- [7] F. Padua, «Juvenile selection of *Gmelina arborea* clones in the Philippines,» *New Forest*, vol. 28, n° 2-3, pp. 195-200, 2004.
- [8] C. García, «Predicción del rendimiento de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en plantaciones forestales,» Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 1998.
- [9] B. Zobel y J. Talbert, *Applied Forest Tree Improvement*, New York, USA: John Wiley, 1984, p. 505.
- [10] B. Zobel y J. Talbert, *Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales*, México, Costa Rica: Limusa, 1988, p. 545.
- [11] B. Plancarte, «Mejoramiento genético y plantaciones,» Centro de Genética Forestal, Chapingo, Texcoco, México, 1990.
- [12] J. Cornelius, «The effectiveness of plus-tree selection for yield,» *Forest Ecology and Management*, vol. 67, n° 1-3, pp. 23-34, 1994.
- [13] S. Franzel, H. Jaenicke y W. Janssen, «Choosing the Right Trees: Setting Priorities for Multipurpose Tree Improvement,» The Hague: International Service for National Agricultural Research, Netherlands, 1996.
- [14] A. Kumar, «Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb),» *Silvae Genetica*, vol. 56, n° 1-6, pp. 32-36, 2007.
- [15] O. Corpuz, «Growth and heritability of three years old *Gmelina* plantation,» de National Research and Development Conference, Phillipines, 2011.
- [16] C. Avila, R. Murillo, O. Murillo y C. Sandoval, «Selección de clones superiores de dos conjuntos genéticos de *Gmelina arborea* en el Pacífico Sur de Costa Rica,» *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 49, n° 1, pp. 17-35, 2015.
- [17] R. Herasme, «Correlaciones juvenil - maduro en *Gmelina arborea* Roxb.,» CATIE, Turrialba, Costa Rica, 1997.
- [18] G. Hodge y W. Dvorak, «The CAMCORE international provenance / progeny trials: genetic parameters and potential gain,» *New Forest*, vol. 28, n° 2-3, pp. 147-166, 2004.
- [19] IMN, «Clima en Costa Rica: Clima de Costa Rica y

variabilidad climática.» Instituto Meteorológico Nacional, San José, 2019.

- [20] R. Murillo, «Evaluación de algunos factores ambientales que afectan la calidad de sitio a nivel de micrositio para melina (*Gmelina arborea* Roxb) plantada en suelos planos en la zona sur de Costa Rica.» UNA, Heredia, Costa Rica, 1996.
- [21] K. Wightman, S. Ward, J. Haggard, B. Rodríguez y J. Cornelius, «Performance and genetic variation of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in provenance and progeny trials in the Yucatan Peninsula of Mexico.» *Forest Ecology and Management*, vol. 255, n° 2, pp. 346-355, 2005.
- [22] E. Lauridsen y E. Kjaer, «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*, vol. 4, n° 1, p. 15, 2002.
- [23] X. Raudales, «Diseño de un programa de mejoramiento genético para *Gmelina arborea* en Zamorano, Honduras.» El Zamorano, Honduras, 2009.
- [24] E. Lauridsen, «Features of some provenances in an international provenance experiment of *Gmelina arborea*.» *New Forest*, vol. 28, n° 2-3, pp. 127-145, 2004.
- [25] R. Salas, «Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón.» TEC, Cartago, Costa Rica, 2012.
- [26] H. Balcorta y J. Vargas, «Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn, Roxb.) de tres años de edad.» *Revista Chapingo*, vol. 10, n° 1, pp. 13-19, 2004.
- [27] F. Padua, «Clonal correlation in growth and stem quality of *Gmelina arborea*.» Ponencia Magistral. En: XII World Forestry Congress, Québec, Canadá, 2003.
- [28] A. Wee, C. Li y W. Dvorak, «Genetic diversity in natural populations of *Gmelina arborea*: implications for breeding and conservation.» *New Forest*, vol. 43, n° 4, pp. 411-428, 2012.