



TEC | Tecnológico
de Costa Rica



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería
Forestal**

**Evaluación de ensayos genéticos de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Costa
Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de
Centroamérica S.A.**

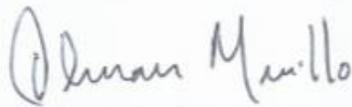
ROY YENDERZON PÉREZ VÁSQUEZ

CARTAGO, COSTA RICA

2016

Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

Evaluación de ensayos genéticos de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Costa Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A.



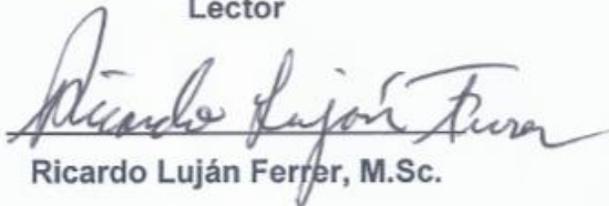
Olman Murillo Gamboa, Ph.D.
Director de Tesis



Yorleny Badilla Valverde, M.Sc.
Lectora



William Hernandez Castro, M.Sc.
Lector



Ricardo Luján Ferrer, M.Sc.
Lector



Roy Pérez Vásquez
Estudiante

Evaluación de ensayos genéticos de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Costa Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A.

RESUMEN

A nivel mundial la madera de teca (*Tectona grandis*) es una de las más apreciadas y comercializadas ocupando el 74% del área plantada con especies tropicales duras de alto valor; en Costa Rica corresponde el 20% de la madera total cosechada corresponde a teca proveniente de plantaciones destinada a exportación. De aquí la importancia de mejorar el rendimiento comercial de las plantaciones con base en el mejoramiento genético.

La evaluación de ensayos genéticos corresponde a una metodología de evaluación eficaz bajo la cual es posible mejorar genéticamente el material plantado comercialmente. En este estudio se evaluaron tres ensayos genéticos (uno ubicado en Darién, Panamá y dos en el pacífico sur de Costa Rica).

En el primer capítulo corresponde a un análisis del comportamiento de los parámetros genéticos y las correlaciones genéticas entre distintas variables evaluadas a ocho edades en un ensayo con 25 genotipos y 2 testigos, los cuales corresponden a semilla. De lo anterior, se observó que tanto para la variable diámetro a la altura del pecho (DAP), como volumen comercial, los parámetros estimados de heredabilidad individual y media del clon alcanza un máximo, y a su vez se estabilizan entre los 4,7 años y 5,8 años de edad; por lo cual, para las condiciones bajo las que se ha encontrado el ensayo, se determina una edad cercana a los 5 años como edad adecuada para realizar selección genotípica de *Tectona grandis*. Al comparar los 10 mejores genotipos con los dos testigos, a una edad de 4,7 años, se determinó que en DAP los 10 mejores clones registraban un incremento del 25,8% respecto a los testigos y en volumen comercial por árbol dicha ganancia ascendía a 68,6%; además, partiendo de la información obtenida por el DAP se determinó que para un turno de rotación de 18 años con semilla comercial, al establecer los 10 genotipos, la cosecha final se realizaría 4,6 años antes que al implementar los testigos.

El segundo capítulo corresponde a una evaluación de dos ensayos clonales en ambientes distintos (uno en Darién, Panamá y otro en el pacífico sur de Costa Rica) con el objetivo

de determinar la interacción genotipo-ambiente de los clones evaluados. De lo anterior, se encontró que en el caso del ensayo de Panamá a los 5,9 años de edad en volumen comercial por árbol no se registraron diferencias significativas entre accesiones; además, a esta edad, los 10 mejores genotipos mostraron una ganancia genética de 4,6% en diámetro a la altura del pecho (DAP) y de 9,3% en volumen comercial por individuo respecto al uso de semilla; partiendo de información diamétrica, se estimó una ganancia en tiempo para la cosecha final de 0,8 años al establecer los 10 mejores genotipos respecto a semilla, lo anterior, tomando como base turnos de rotación de 18 años. En el ensayo de Costa Rica, a partir de los 3,0 años de edad las heredabilidades (tanto media del clon como individual) se estabilizan, lo que indica la posibilidad de realizar selección genotípica temprana; por otro lado, a los 5,4 años se registraron en volumen comercial por individuo, diferencias altamente significativas entre las accesiones. La ganancia genética mostrada por los 10 mejores clones, al compararlos con los testigos, fue de 33,0% en DAP y 88,7% en volumen comercial por individuo, la ganancia en tiempo para la cosecha final fue de 5,9 años respecto a los testigos.

La interacción genotipo-ambiente indicó la presencia de clones estables en ambientes diferentes con alto rendimiento volumétrico, estos corresponden a los clones 24, 22, 26, 27, 29 y 18, así mismo, se identificaron genotipos con bajo rendimiento en ambos sitios los cuales fueron los clones 8, 19 y en mayor medida el 7. Además, se encontraron genotipos con una fuerte interacción genotipo-ambiente, los cuales mantuvieron rendimientos volumétricos muy contrastantes en ambos ensayos evaluados.

Palabras clave: Teca, ensayo clonal, mejoramiento genético, silvicultura clonal, Costa Rica.

ABSTRACT

A worldwide level, teak (*Tectona grandis*) wood is one of the most appreciated and commercialized occupying 74% of the area planted with hard tropical species of high value; in Costa Rica, 20% of the total harvested wood corresponds to teak from plantations destined for export. Hence the importance of improving the commercial performance of plants based on genetic improvement.

The evaluation of genetic testing corresponds to an effective evaluation methodology under which it is possible to genetically improve the material planted commercially. In this study, three genetic tests were evaluated (one located in Darién, Panama and two in the south pacific on Costa Rica).

The first chapter corresponds to an analysis of the behavior of genetic parameters and the genetic relationships between different variables evaluated at eight ages in a test with 25 genotypes and 2 controls, which correspond to seed. From the above, it was observed that for both the variable diameter at breast height (DBH) and the commercial volume, the estimated parameters of the individual heritability and clone means reach the maximum, and in turn stabilize between the 4.7 years and 5.8 years; therefore, for the conditions under which, for a reasonable price, for a generic selection of *Tectona grandis*. All 10 best genotypes with the two controls, an age of 4.7 years, it was determined that in the DBH the 10 best clones recorded an increase of 25.8% with respect to the controls and in commercial volume by the tree gain amounted to 68.6%; In addition, based on the information obtained by the DAP, it was determined that for a rotation shift of 18 years with commercial seed, the 10 genotypes were established, the final harvest was done 4.6 years before the controls were executed.

The second corresponds to an evaluation of two clonal tests in different environments (one in Darien, Panama and one in the south pacific on Costa Rica) with the objective of determining the genotype-environment interaction of the clones evaluated. From the above, it was found that in the case of Panama test at 5.9 years of age in commercial volume per tree there is no significant difference between accessions; In addition, at this age, the 10 best genotypes showed a genetic gain of 4.6% in diameter at breast height (DBH) and 9.3% in commercial volume per person relative to seed use; Based on diametric information, a gain in time for the final harvest of 0.8 years was estimated to establish the 10 best genotypes with respect to seed, previous, based on rotation shifts of

18 years. In the Costa Rican trial, from the age of 3.0 the heritabilities (both clone medium and individual) are stabilized, indicating the possibility of early genotypic selection; On the other hand, the 5.4 years are recorded in commercial volume per individual, the highly significant differences between accesses. The genetic gain shown by the 10 best clones, all with the controls, was 33.0% in DAP and 88.7% in commercial volume per individual, the gain in time for harvest was 5.9 years with respect to controls.

The genotype-environment interaction indicated the presence of stable clones in different environments with high volumetric yield, these correspond to clones 24, 22, 26, 27, 29 and 18, and genotypes with low yield were identified in both sites. Clones 8, 19 and to a greater extent were 7. In addition, genotypes with a strong genotype-environment interaction were found, which maintained very contrasting volumetric yields in both trials evaluated.

Keywords: Teak, genetic test, tree improvement, clonal forestry, Costa Rica.

DEDICATORIA

A mi madre, Noemy, quien a pesar de todas las dificultades y sacrificios por los que ha pasado al sacarme adelante sola, su amor la ha llevado a dar día con día su mejor esfuerzo para facilitarme el camino en esta aventura que llamamos vida. Gracias por todo amor que he tenido el privilegio de recibir de tu parte, gracias por esforzarte para verme feliz.

A mi abuela, Juana, quien con paciencia y amor, procuró inculcar en mí los mejores principios para ser una persona de bien.

A mi padrastro, Martín, quien a pesar de no ser mi padre biológico se ha comportado como tal y ha estado a mi lado apoyándome en los momentos que lo he necesitado.

A mi abuelo, Adilio, que a pesar de su enfermedad y solo disfrutar durante mi infancia su presencia, llenó mi vida de cariño y felicidad hasta convertirse en uno de los mejores amigos que he llegado a tener.

A mi hermano menor, Jossua, espero que el camino que he recorrido te sirva de inspiración para alcanzar tus metas.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Jehová, por darme la bendición de vivir y la libertad de escoger mi camino, las cuales son cosas invaluable. Que a pesar de no merecerlo y de los errores que cometo día con día sigue ahí, cuidando de mí, demostrándome su amor misericordioso. Gracias por permitirme encontrarme hoy aquí, y acompañarme en cada uno de mis pasos.

A mi madre, abuela, padrastro, hermano y familia, quienes me han dado los ánimos y apoyo para salir adelante con mis estudios.

A mi tutor Olman Murillo, quien pacientemente me transmitió los conocimientos necesarios para realizar este trabajo. Gracias por darme la oportunidad de desarrollar mi tesis en un tema tan interesante e importante a nivel forestal y guiarme en un momento tan relevante en mi vida académica.

Los lectores Yorleny Badilla y William Hernandez por su apoyo en la realización de este trabajo, sus ideas mejoraron considerablemente este documento.

A la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A. y muy en especial a Ricardo Luján, por permitirme desarrollar esta tesis con ustedes, también por apoyarme y orientarme en el trabajo de campo y ayudarme con ideas valiosas que ahora se encuentran en este documento.

A Raynier y su familia, Mario, Rolando, Guillermo, Alexis y su familia y Tomás, por hacer mi estadía durante la recolección de información más agradable y apoyarme con el trabajo de campo.

A los profesores de la escuela de ingeniería forestal por el conocimiento transmitido, el cual pienso utilizar responsablemente para ejercer como profesional, gracias por los consejos recibidos por muchos de ustedes. También al personal administrativo de la escuela y choferes de las “toyotonas” por no limitarse a realizar su trabajo, sino también dar un trato agradable al relacionarse con ellos.

A mis compañeros de carrera, con los que me siento totalmente identificado al pasar por las mismas dificultades para llegar hoy acá. Gracias por esos ratos de agradable platica y diversión que logré disfrutar con ustedes durante estos seis años de estudio.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | ii |
| ABSTRACT | iv |
| DEDICATORIA..... | vi |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Capítulo I. Edad óptima de selección genotípica en un ensayo clonal de teca (<i>Tectona grandis</i> L.f.) en el Pacífico sur de Costa Rica | 3 |
| RESUMEN | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| INTRODUCCIÓN | 5 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 7 |
| RESULTADOS..... | 13 |
| DISCUSIÓN | 25 |
| CONCLUSIONES | 33 |
| Capítulo II. Interacción genotipo-ambiente en ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i> L.f.) en Costa Rica y Panamá..... | 35 |
| RESUMEN | 35 |
| ABSTRACT | 36 |
| INTRODUCCIÓN | 37 |
| MATERIAL Y MÉTODOS..... | 39 |
| RESULTADOS..... | 46 |
| DISCUSIÓN | 60 |
| CONCLUSIONES | 71 |
| REFERENCIAS..... | 73 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Estimación de la calidad general del árbol, basada en el aporte individual de sus primeras trozas comerciales (Murillo y Badilla, 2004a). | 10 |
| Cuadro 2. Descripción de los parámetros generados por SELEGEN-REML/BLUP mediante el modelo 2. | 12 |
| Cuadro 3. Precisión en la estimación de los parámetros genéticos de las variables evaluadas en ocho mediciones del ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> en Osa, Pacífico Sur, Costa Rica..... | 13 |
| Cuadro 4. Parámetros genéticos para la variable DAP (cm) de 27 genotipos evaluados a ocho edades distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 14 |
| Cuadro 5. Parámetros genéticos para la variable daño por viento de 27 genotipos en dos mediciones distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 15 |
| Cuadro 6. Parámetros genéticos para la variable calidad del fuste comercial de 27 genotipos en tres mediciones distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 16 |
| Cuadro 7. Parámetros genéticos para la variable volumen comercial (m ³) en 27 genotipos de teca (<i>Tectona grandis</i>) en seis mediciones distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica..... | 17 |
| Cuadro 8. Matriz de correlaciones genéticas para un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> con ocho mediciones en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 21 |
| Cuadro 9. Ganancia genética esperada si se selecciona los 10 mejores clones de teca (<i>Tectona grandis</i>) a los 4,7 años, respecto al promedio del ensayo y al promedio de los testigos en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 24 |
| Cuadro 10. Estimación de la calidad general del árbol, basada en el aporte individual de sus primeras trozas comerciales (Murillo y Badilla, 2004a). | 42 |
| Cuadro 11. Descripción de los parámetros generados por SELEGEN-REML/BLUP mediante el modelo 2 y 3. | 45 |
| Cuadro 12. Precisión de la estimación de los parámetros genéticos de las variables evaluadas en 3 mediciones del ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> en Agua Fría, Darién, Panamá..... | 46 |
| Cuadro 13. Parámetros genéticos de un ensayo clonal con 33 genotipos en tres mediciones en Agua Fría, Darién, Panamá. | 47 |
| Cuadro 14. Matriz de correlaciones genéticas de 33 genotipos para las variables evaluadas en tres mediciones distintas en Agua Fría, Darién, Panamá. | 49 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 15. Ganancia genética esperada por los 10 mejores genotipos a 5,9 años respecto al promedio del ensayo y el promedio de los testigos en Agua Fría, Darién, Panamá..... | 51 |
| Cuadro 16. Precisión de la estimación de los parámetros genéticos de las variables evaluadas en 2 mediciones del ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> en Osa, Pacífico sur, Costa Rica..... | 51 |
| Cuadro 17. Parámetros genéticos de un ensayo clonal con 35 genotipos en dos mediciones en Osa, Pacífico sur, Costa Rica..... | 53 |
| Cuadro 18. Matriz de correlaciones genéticas de 35 genotipos para las variables evaluadas en dos mediciones distintas en Osa, Pacífico sur, Costa Rica..... | 55 |
| Cuadro 19. Ganancia genética esperada por los 10 mejores genotipos a 5,4 años respecto al promedio del ensayo y el promedio de los testigos en Osa, Pacífico sur, Costa Rica..... | 57 |
| Cuadro 20. Parámetros genéticos de dos ensayos genéticos (uno en Panamá y otro en Costa Rica) con 32 genotipos en común..... | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ensayo clonal de Teca (<i>Tectona grandis</i>) con 9 años de edad de la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A. en Salamá, Osa, Pacífico sur, Costa Rica. | 7 |
| Figura 2. Diseño GENFORES para la evaluación genotípica de accesiones, basado en 2 ó 3 parejas de individuos (parcela) distribuidas aleatoriamente dentro de cada uno de los seis bloques (Murillo & Badilla, 2004b)..... | 8 |
| Figura 3. A. comportamiento de la heredabilidad del clon individual en sentido estricto; B. comportamiento de la heredabilidad media; ambas, en función de la edad para la variable DAP y volumen comercial en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 18 |
| Figura 4. Ranking del valor genético del volumen comercial (m ³) estimado a los 4,7 años para 27 genotipos de teca (<i>Tectona grandis</i>) en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica. | 23 |
| Figura 5. A. ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> en La Loma, Agua fría Darién, Panamá. B. ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> en Puerto Escondido, Osa, Puntarenas, Costa Rica. .. | 39 |
| Figura 6. Diseño GENFORES para la evaluación genotípica de accesiones, basado en 2 ó 3 parejas de individuos (parcela) distribuidas aleatoriamente dentro de cada uno de los seis bloques (Murillo & Badilla, 2004b)..... | 41 |
| Figura 7. A. comportamiento de la heredabilidad del clon individual en sentido estrecho; B. comportamiento de la heredabilidad media; ambas, en función de la edad para la variable DAP y Volumen comercial en Agua Fría, Darién, Panamá. | 48 |
| Figura 8. Valores genéticos para la variable volumen comercial (m ³) estimado a los 5,9 años para 33 genotipos en Agua Fría, Darién, Panamá..... | 50 |
| Figura 9. A. comportamiento de la heredabilidad del clon individual en sentido estrecho; B. comportamiento de la heredabilidad media; ambas, en función de la edad para la variable DAP y Volumen comercial en Osa, Pacífico sur, Costa Rica..... | 54 |
| Figura 10. Valores genéticos para la variable volumen comercial (m ³) estimado a los 5,4 años para 35 genotipos en Osa, Pacífico sur, Costa Rica. | 56 |
| Figura 11. Ranking genético para la variable volumen comercial de los ensayo de Panamá y Costa Rica a las edades de 5,9 años y 5,4 años respectivamente. | 59 |

INTRODUCCIÓN

Tectona grandis es una especie maderable de alto valor comercial que ha poseído gran importancia durante siglos debido a las propiedades de su madera: fuerte, liviana, durable, alta estabilidad; no se corroe en contacto con metales; buena trabajabilidad y dureza; resistente a las termitas, productos químicos, hongos y la intemperie. Además, es de fácil propagación, establecimiento y manejo. Estas características han colocado a la teca como la madera tropical de alto valor más cultivada en el mundo, ocupando el 74% de la superficie plantada con este tipo de especies (Camino y Morales, 2013).

La alta demanda de su madera en países de gran crecimiento económico y poblacional, como la India, China, Vietnam y los países de Europa, ya sea por corrientes conservacionistas o por la calidad de la madera, le ha otorgado un gran potencial en el mercado (Camino y Morales, 2013). Esto ha impulsado un considerable expansionismo, logrando ser introducida en América a inicios del siglo XX (Fonseca, 2004).

En América Tropical fue introducida por Trinidad en 1913, poco después, entre los años 1926 y 1929 se establecieron las primeras plantaciones en Costa Rica, con material proveniente de Trinidad (Fonseca, 2004). A partir de este momento dicho país ha jugado un papel muy importante en la silvicultura de esta especie ubicándose en la actualidad como el país que ha liderado el desarrollo de las plantaciones en Centroamérica (Camino y Morales 2013), debido en gran medida al mejoramiento genético alcanzado.

Actualmente el mejoramiento genético juega un papel crucial en la optimización del rendimiento comercial de plantaciones, que además, se ven afectadas por condiciones ambientales y de manejo silvicultural. Según Camino y Morales, (2013) la calidad del material genético, sea de semillas, estacas, o clones corresponde a uno de los principios que se deben tomar en cuenta en la silvicultura moderna.

La clonación es una opción ideal para aumentar el rendimiento comercial de las plantaciones; Eldridge et al. (1993), Asis (1996), citados por Eleotério, Vilela, da Silva y Ribeiro, (2011), afirman que la clonación también conduce a una mayor uniformidad de crecimiento, forma, cualidades tecnológicas y otras características deseables. Sin embargo, para que la clonación sea eficiente debe ser complementada con metodologías de evaluación que permita identificar los clones con mejores características.

Una metodología de evaluación eficaz bajo la cual es posible mejorar genéticamente el material plantado, corresponde a los ensayos genéticos; los cuales permiten evaluar estadísticamente variables de interés de los clones propagados. En este nivel, el principio de la selección se basa en dos pasos básicos: la predicción del valor genético de los individuos y la decisión sobre la mejor forma de utilización de los individuos con los más altos valores genéticos, ya sea para su uso en plantaciones comerciales o para la realización de nuevos cruces (Eleotério et al., 2011).

Según Eleotério et al. (2011) valores estimados altos de heredabilidad revelan una situación favorable para la selección óptima en programas de mejoramiento genético, los cuales complementariamente con una cuidadosa selección de la fuente del material y los genotipos superiores, traerán un aumento de la productividad de determinada especie y por lo tanto un mayor rendimiento económico (Duarte, 2012).

Para este estudio se estableció como objetivo evaluar tres ensayos clonales de *Tectona grandis* L.f. establecidos por la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica (BARCA S.A.) en Panamá y Costa Rica.

Capítulo I.

Edad óptima de selección genotípica en un ensayo clonal de teca (*Tectona grandis* L.f.) en el Pacífico sur de Costa Rica

RESUMEN

A nivel mundial la madera de teca (*Tectona grandis*) es una de las más apreciadas y comercializadas; en Costa Rica corresponde al 20% de la madera total cosechada. De aquí la importancia de mejorar el rendimiento comercial de las plantaciones con base en el mejoramiento genético.

En este estudio se analizó el comportamiento de los parámetros genéticos y las correlaciones genéticas entre distintas variables evaluadas a ocho edades en un ensayo de bloques completos al azar de acuerdo al diseño propuesto por GENFORES con 25 genotipos y 2 testigos, los cuales correspondieron a semilla. De lo anterior se observó que tanto para la variable diámetro a la altura del pecho (DAP), como volumen comercial los parámetros estimados de heredabilidad individual y media del clon alcanza un máximo, y a su vez se estabilizan entre los 4,7 años y 5,8 años de edad; por lo cual, para las condiciones bajo las que se ha encontrado el ensayo, se determina una edad cercana a los 5 años como edad adecuada para realizar selección genotípica de *Tectona grandis*. A partir de los 2 años, las variables cuantitativas se encuentran alta y positivamente correlacionadas genéticamente entre sí. Al comparar los 10 mejores genotipos con los dos testigos, a una edad de 4,7 años, se determinó que en DAP los 10 mejores clones registraban un incremento del 25,8% respecto a los testigos y en volumen comercial por árbol dicha ganancia ascendía a 68,6%; además, partiendo de la información obtenida por el DAP se determinó que para un turno de rotación de 18 años con semilla comercial, al establecer los 10 genotipos la cosecha final se realizaría 4,6 años antes que al implementar los testigos.

Palabras clave: Teca, mejoramiento genético, silvicultura clonal, ensayo clonal, Costa Rica.

ABSTRACT

Worldwide, teak wood (*Tectona grandis*) is one of the most appreciated and commercialized; In Costa Rica it corresponds to 20% of the total harvested wood. Hence the importance of improving the commercial performance of plantations based on genetic improvement.

This study analyzed the behavior of genetic parameters and genetic correlations between different variables evaluated at eight ages in a randomized complete block test according to the design proposed by GENFORES with 25 genotypes and 2 controls, which corresponded to seed. From the above it was observed that for both the variable diameter at breast height (DBH) and the commercial volume the estimated parameters of individual and average heritability of the clone reached a maximum, and in turn stabilized between 4.7 years and 5.8 years old; Therefore, for the conditions under which the test was found, an age of about 5 years is determined as the appropriate age for genotypic selection of *Tectona grandis*. From 2 years, the quantitative variables are high and positively correlated genetically with each other. When comparing the 10 best genotypes with the two controls at an age of 4.7 years, it was determined that in the DBH the 10 best clones recorded an increase of 25.8% with respect to the controls and in commercial volume per tree, to 68.6%; In addition, based on the information obtained by the DBH, it was determined that for an 18-year rotation shift with commercial seed, the final harvest would be performed 4.6 years earlier than when the controls were used to establish the 10 genotypes.

Keywords: teak, tree improvement, clonal forestry, genetic test, Costa Rica

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la madera de teca (*Tectona grandis*) es una de las más apreciadas y comercializadas, sin embargo, debido a que la demanda es mayor que los recursos disponibles, muchos países se inclinaron por introducir esta especie en los programas de reforestación (Abdelnour y Muñoz, 2005).

Ante esta situación, Costa Rica es un claro ejemplo de incursión en la producción de esta madera. Información generada a partir de 378 industrias, estimó que en Costa Rica se aprovechan aproximadamente 1.017.000 m³ de madera en rollo, de esta cantidad 788.666 m³ (77,6%) proviene de plantaciones de la cual, a su vez 201.919 m³ corresponde a madera de teca (*Tectona grandis*) exportada; es decir, aproximadamente al 20% de la madera cosechada en el país corresponde a exportación de teca (*Tectona grandis*); la cual, tiene principalmente como destino Singapur, India, Vietnam, China, y Emiratos Árabes Unidos. En el 2014 la teca presentó una mejoría en exportaciones del 6,2% (Oficina Nacional Forestal [ONF], 2015).

Este incremento en el consumo de maderas de plantaciones se ha generado principalmente como consecuencia de la escasez de madera proveniente de bosque natural y la creciente demanda de productos forestales por parte de la población (Espitia, Murillo y Castillo, 2011). Sin embargo, Murillo y Badilla (2004a) aseguran que para convertir la actividad forestal en un proceso productivo, rentable y seguro, es necesario desarrollar programas de mejoramiento y manejo que conduzcan a la obtención de materia prima de la más alta calidad, con el menor costo posible.

Ante esto, la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) ha jugado un papel muy importante a nivel nacional desde el 2000. GENFORES es una cooperativa que busca una vinculación entre el sector académico y el sector productivo generando una red de intercambio de conocimiento y material genético entre sus miembros con desarrollo de programas de mejoramiento genético con fines comerciales de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*) y especies nativas (Murillo, 2007, Murillo, Badilla, Villalobos y Rojas, 2013.)

Actualmente GENFORES cuenta con la asociación de 12 empresas y organizaciones alrededor del país (Murillo et al. 2013), de las cuales seis, aportaron el material evaluado en este estudio.

El objetivo de este estudio es determinar la edad óptima de selección genotípica en un ensayo clonal establecido por GENFORES en colaboración con la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A. en el Pacífico sur de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El ensayo clonal se ubica en Salamá de Osa, Puntarenas; se estableció el 29 de octubre del 2007; la ubicación geográfica corresponde a 8° 49'12,52" norte y 83°17' 21,20" oeste; la zona de vida concuerda con bosque muy húmedo tropical, la elevación promedio sobre el nivel del mar es de 29 m, la precipitación media anual es de 3700 mm y la temperatura media es de 26 °C (Fallas y Valverde, 2009); el ensayo se encuentra en sitios planos con obras de drenajes, rodeado por áreas dedicadas al pastoreo de ganado, plantaciones forestales y parches de bosque.



Figura 1. Ensayo clonal de Teca (*Tectona grandis*) con 9 años de edad de la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A. en Salamá, Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

Descripción de los materiales

Los genotipos evaluados proceden del aporte de cinco clones por cada una de las empresas miembro de la cooperativa de mejoramiento genético GENFORES. Dos accesiones se utilizaron como testigo, que corresponde a semilla comercial (TS) y semilla proveniente del huerto semillero (THS), ambos origen del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (CACH) en Guanacaste.

Las empresas se codificaron con números del 1 al 5, al igual que cada uno de los clones aportados individualmente por cada empresa participante. De esta manera, cada accesión tiene un código de dos cifras, en donde la primera indica la empresa u origen y la segunda identifica el clon dentro de la empresa.

Diseño Experimental

Se utilizó el diseño experimental propuesto por GENFORES para evaluaciones genéticas (Murillo & Badilla, 2004b) el cual corresponde de bloques completos al azar con seis repeticiones (Figura 2). La densidad inicial de siembra fue de 1111 árboles por hectárea (3 m por 3 m); cada clon estuvo representado por 4 parejas de rametos (parcela) dentro de cada bloque, separados físicamente entre sí y distribuidos aleatoriamente dentro de cada bloque. Cada accesión estuvo representada inicialmente por 48 árboles (rametos) en el ensayo.

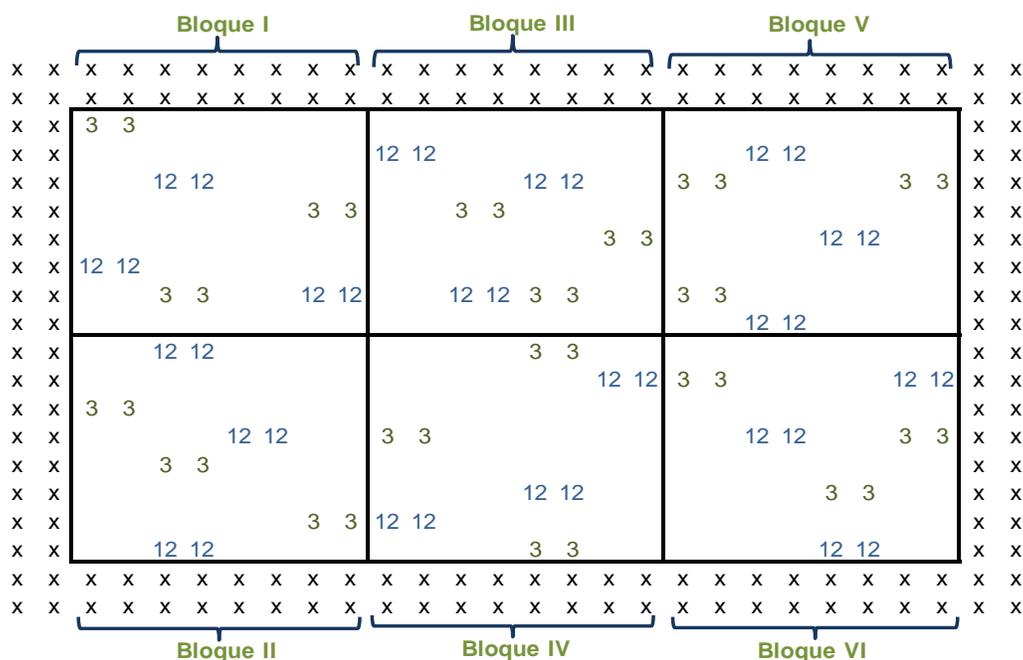


Figura 2. Diseño GENFORES para la evaluación genotípica de accesiones, basado en 2 ó 3 parejas de individuos (parcela) distribuidas aleatoriamente dentro de cada uno de los seis bloques (Murillo & Badilla, 2004b).

En resumen se evaluaron un total de 27 accesiones y un total de 1296 individuos, en todo el ensayo. Previo al análisis, se depuró la base de datos, donde se eliminó inconsistencias entre las mediciones anteriores y entre los valores reportados en crecimiento para una edad determinada.



En cuanto a la preparación de sitio, el ensayo fue establecido bajo metodologías semejantes a las utilizadas por la empresa en plantaciones comerciales; así mismo el manejo brindado se ha realizado de forma análoga al resto del área forestal. El ensayo recibió un raleo del 50% a los cuatro años de edad, en el cual se seleccionó el árbol con menor valor comercial dentro cada pareja de rametos para ser eliminado; posteriormente, a los 6 años se realizó un segundo raleo en donde solo se dejó en campo a los individuos correspondientes a los 15 mejores clones; dicha selección se hizo basada en el ranking de la medición a los 5,8 años de edad.

Recolección de datos

El ensayo fue medido en ocho ocasiones (0,7 años, 1,0 años, 2,0 años, 3,4 años, 4,7 años, 5,8 años, 6,7 años y 8,9 años de edad). La identificación de los individuos se realizó con apoyo de croquis y como información de campo, se recolectó el DAP, presencia de daño al viento indicando con 2 los árboles que no presentan afectación y 1 aquellos que fueron afectado por el viento y la calidad de cada troza comercial (2.5 m de longitud) en una escala del uno al cuatro, siendo 1 para describir a trozas con pocos o ningún defecto y 4 para describir las trozas que registran los mayores defectos; de manera adicional se registró el número de la fila dentro de cada bloque, código del clon según el croquis del ensayo y un consecutivo dentro de cada bloque. Cada árbol fue marcado (y remarcado cuando fuese necesario) con el código del clon y el punto de medición del diámetro para facilitar su identificación y estandarizar la altura a la cual se realizaba la medición.

Análisis de los datos

Para realizar el análisis de los datos recolectados, fue necesario unificar las bases de datos de mediciones pasadas con las actuales, de tal manera que cada individuo contara con la información recolectada en todas las mediciones. De esta forma se podría evaluar el comportamiento de las variables de interés de cada genotipo a través del tiempo.

Una vez unificadas las bases de datos, se estimó la calidad general de cada individuo según la cantidad de trozas comerciales estimadas y las respectivas calificaciones asignadas a cada troza (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estimación de la calidad general del árbol, basada en el aporte individual de sus primeras trozas comerciales (Murillo y Badilla, 2004a).

| Cantidad de trozas | Primer troza | Segunda troza | Tercera troza | Cuarta troza | Quinta troza |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| 1 | 1,00 | | | | |
| 2 | 0,60 | 0,40 | | | |
| 3 | 0,45 | 0,33 | 0,22 | | |
| 4 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 0,10 | |
| 5 | 0,35 | 0,25 | 0,20 | 0,15 | 0,05 |

En la ecuación 1 se muestra el ejemplo para calcular la calidad general en escala de 1 a 4 de un individuo cuyo fuste cuenta con cuatro trozas comerciales.

$$Calidad\ general = T1 * 0,40 + T2 * 0,30 + T3 * 0,20 + T4 * 0,10 \quad (1)$$

Dónde:

T1, T2, T3 y T4: Calidades (en escala de 1 a 4) asignadas a cada toza.

Luego de obtener la calidad general de cada individuo, se calculó la calidad porcentual mediante la ecuación 2.

$$Calidad\ (\%) = 100 * \left[1 - \left(\frac{calidad\ general - 1}{3} \right) \right] \quad (2)$$

Además, a partir de los diámetros recolectados, se estimó el volumen comercial hasta un diámetro mínimo de 5 cm calculado con el programa Avalúos Forestales en Excel creado por Murillo y Badilla (2011). Este programa utiliza un modelo específico para estimar el volumen de *Tectona grandis* aplicando un coeficiente de reducción dependiendo del DAP, lo anterior a partir de recolección de perfiles de fuste en plantaciones en Costa Rica (Murillo y Badilla 2011). El programa estima el volumen hasta toparse con una de tres condiciones relacionadas a la longitud del fuste comercial: la altura total, el número de trozas comerciales o el diámetro mínimo; en este caso, el volumen fue estimado hasta un diámetro mínimo de 5 cm.

Posteriormente se procedió a estandarizar la base de datos en Excel y se analizó el ensayo mediante el software SELEGEN, que utiliza el procedimiento estadístico REML/BLUP, creado por Resende (2007). Este software utiliza los procedimientos de

Máxima Verosimilitud Restringida Lineal (REML) y Mejor Predicción Linear No Sesgada (BLUP) (Ávila, Salas y Murillo, 2016). La ventaja de estos dos procesos es que manejan con mayor eficiencia las bases de datos no balanceadas, para la generación de parámetros estadísticos (componentes de varianza) sin sesgo (Resende, 2006).

El estadístico utilizado para evaluar el ensayo clonal corresponde al modelo 2 (Bloques Completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela) del software SELEGEN cuyo modelo estadístico se describe en la ecuación (3). La descripción de los parámetros generados por el programa mediante este modelo se presentan en el cuadro 2.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (3)$$

Donde “y” es el vector de datos, es decir, la variable dependiente; “r” es el vector de los efectos de la repetición, en esta caso el bloque (asumido como fijo); “g” es el vector de los efectos genéticos, el clon (asumido como aleatorio); “p” es el vector de los efectos de la parcela, lo que se refiere a la unidad experimental (asumido como aleatorio); “e” es el vector del error de los residuos (asumido como aleatorio); Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia de efectos identificados (Resende, 2006).

Mediante este modelo se realizó el análisis de las variables en forma individual para obtener los parámetros genéticos para cada variable así como el ranking respectivo de los genotipos evaluados. Posteriormente, se analizaron las variables en conjunto por medio del modelo 102 para generar matrices de correlaciones genéticas (edad-edad) entre todas las variables analizadas.

Cuadro 2. Descripción de los parámetros generados por SELEGEN-REML/BLUP mediante el modelo 2.

| Parámetro | Descripción |
|-------------------------------------|---|
| Vg | Varianza genética |
| V_{parc} | Varianza ambiental entre parcela |
| Ve | Varianza residual o no explicada por el modelo |
| Vf | Varianza fenotípica total = $Vg + V_{parc} + Ve$ |
| h²_g | Heredabilidad individual en sentido amplio |
| c²_{parc} | Coefficiente de determinación de la parcela |
| h²_{mc} | Heredabilidad media del clon |
| Precisión | Precisión en la estimación de los parámetros |
| CV_{gi}% | Coefficiente de variación genética |
| CV_e% | Coefficiente de variación experimental |
| CV_r | Coefficiente de variación relativa |
| PEV | Varianza del error de predicción de los valores genotípicos |
| SEP | Desviación estándar del valor genotípico de cada clon |

Además, partiendo de los valores genéticos estimados por SELEGEN-REML/BLUP para cada genotipo, se realizó el ranking genético en función del volumen comercial por individuo al año que se estimase como el óptimo para realizar selección. Esta edad se identificó analizando el comportamiento de los parámetros genéticos en el tiempo. Así mismo, se estimó la ganancia genética tanto en DAP como volumen comercial de los 10 mejores clones respecto al promedio del ensayo y los testigos. Finalmente con la información anteriormente mencionada se proyectó la ganancia en edad de cosecha final tomando como referencia un turno de rotación de 18 años.

RESULTADOS

Posterior al análisis de las mediciones en SELEGEN-REML/BLUP se identificaron las variables cuyos parámetros que fueron estimados con precisiones aceptables ($>0,5$), únicamente dichas variables fueron las tomadas en cuenta en este estudio para garantizar mayor veracidad de la información generada, obteniendo de tal manera, un análisis sobre los resultados completamente confiable (Cuadro 3).

Como se aprecia en el cuadro 3 de las variables evaluadas inicialmente, el daño por viento a los 5,8 años, así como el volumen comercial a 1,0 años de edad, no alcanzaron niveles de predicción permisibles en la estimación de los parámetros genéticos, por lo cual se omitieron del análisis de este estudio. En resumen en este estudio se consideraron 19 variables.

Cuadro 3. Precisión en la estimación de los parámetros genéticos de las variables evaluadas en ocho mediciones del ensayo clonal de *Tectona grandis* en Osa, Pacífico Sur, Costa Rica.

| Edad (años) | DAP | Daño viento | Calidad | Volumen comercial |
|-------------|------|-------------|---------|-------------------|
| 0,7 | 0,58 | | | |
| 1,0 | 0,75 | | | 0,34 |
| 2,0 | 0,93 | | | 0,94 |
| 3,4 | 0,95 | 0,78 | 0,81 | 0,95 |
| 4,7 | 0,96 | 0,67 | | 0,96 |
| 5,8 | 0,95 | 0,46 | | 0,95 |
| 6,7 | 0,82 | | 0,83 | 0,91 |
| 8,9 | 0,75 | | 0,83 | 0,77 |

En cuanto a los parámetros obtenidos para las distintas mediciones de la variable DAP, como es de esperar, se observa una mayor heredabilidad, tanto en sentido individual, como media del clon, conforme aumenta la edad, alcanzando los mayores niveles a los 4,7 años de edad para ambas heredabilidades, 24% y 92,6% respectivamente (Cuadro 4). El comportamiento de las heredabilidades para esta variable se puede observar mejor en la figura 3.

Los dos últimos años de medición muestran una caída en los valores tanto de heredabilidad individual como heredabilidad media del clon, registrando descensos superiores al 18% en el caso de heredabilidad individual y 24% en heredabilidad media por genotipo, ambos respecto al mayor valor registrado para cada parámetro (Cuadro 4).

Cuadro 4. Parámetros genéticos para la variable DAP (cm) de 27 genotipos evaluados a ocho edades distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

| Edad (años) | 0,7 | 1,0 | 2,0 | 3,4 | 4,7 | 5,8 | 6,7 | 8,9 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Observaciones | 766 | 1242 | 1282 | 1281 | 633 | 537 | 288 | 288 |
| Vg | 0,007 | 0,029 | 0,304 | 0,823 | 1,880 | 1,929 | 0,540 | 0,600 |
| Vparc | 0,026 | 0,014 | 0,025 | 0,024 | 0,182 | 0,250 | 0,220 | 0,739 |
| Ve | 0,568 | 1,267 | 2,764 | 5,032 | 5,760 | 6,108 | 9,533 | 14,379 |
| Vf | 0,601 | 1,310 | 3,093 | 5,879 | 7,822 | 8,288 | 10,294 | 15,718 |
| h²g | 0,011 ±0,011 | 0,022 ±0,012 | 0,098 ±0,025 | 0,140 ±0,030 | 0,240 ±0,055 | 0,233 ±0,059 | 0,052 ±0,038 | 0,038 ±0,033 |
| c²parc | 0,043 | 0,011 | 0,008 | 0,004 | 0,023 | 0,030 | 0,021 | 0,047 |
| h²mc | 0,331 | 0,556 | 0,858 | 0,904 | 0,926 | 0,905 | 0,679 | 0,562 |
| Precisión | 0,576 | 0,746 | 0,926 | 0,951 | 0,962 | 0,951 | 0,824 | 0,750 |
| CVgi% | 4,112 | 3,524 | 5,354 | 6,843 | 7,371 | 6,972 | 3,155 | 3,007 |
| CVe% | 14,306 | 7,711 | 5,329 | 5,473 | 5,108 | 5,054 | 4,854 | 5,934 |
| CVr | 0,287 | 0,457 | 1,005 | 1,250 | 1,443 | 1,380 | 0,650 | 0,507 |
| PEV | 0,005 | 0,013 | 0,043 | 0,079 | 0,139 | 0,183 | 0,174 | 0,263 |
| SEP | 0,068 | 0,114 | 0,208 | 0,282 | 0,373 | 0,428 | 0,417 | 0,513 |
| Media general | 2,01 | 4,86 | 10,30 | 13,26 | 18,60 | 19,92 | 23,30 | 25,76 |

La variable daño por viento mostró valores de heredabilidad individual bajos para las mediciones analizadas, alcanzando el mayor valor, a los 3,4 años con un valor de 2,6%. En cuanto a la heredabilidad media del clon, se observa un descenso del segundo año respecto al primero, alcanzando el valor más alto a los 3,4 años (60,4%) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros genéticos para la variable daño por viento de 27 genotipos en dos mediciones distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

| Edad (años) | 3,4 | 4,7 |
|--------------------------|-------------|-------------|
| Observaciones | 1279 | 633 |
| Vg | 0,004 | 0,001 |
| Vparc | 0,001 | 0,003 |
| Ve | 0,163 | 0,060 |
| Vf | 0,169 | 0,064 |
| h²g | 0,026±0,013 | 0,022±0,017 |
| c²parc | 0,007 | 0,043 |
| h²mc | 0,604 | 0,447 |
| Precisión | 0,777 | 0,669 |
| CVgi% | 3,797 | 3,463 |
| CVe% | 7,523 | 9,429 |
| CVr | 0,505 | 0,367 |
| PEV | 0,002 | 0,001 |
| SEP | 0,042 | 0,028 |
| Media general | 1,76 | 1,07 |

Otra variable que presentó valores bajos de heredabilidad individual en todos los años de medición corresponde a la calidad del fuste comercial de los individuos, la cual no superó el 5,1% en ninguno de los años evaluados. Sin embargo, la heredabilidad media por genotipo mostró valores aceptables desde los 3,4 años de edad, alcanzando los porcentajes más altos a los 6,7 y 8,9 años (posterior al segundo raleo) 68,1% y 68,9% respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Parámetros genéticos para la variable calidad del fuste comercial de 27 genotipos en tres mediciones distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

| Edad (años) | 3,4 | 6,7 | 8,9 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Observaciones | 1254 | 283 | 287 |
| Vg | 12,306 | 6,246 | 2,380 |
| Vparc | 5,255 | 1,834 | 0,283 |
| Ve | 308,562 | 115,130 | 45,768 |
| Vf | 326,123 | 123,210 | 48,430 |
| h²g | 0,038±0,016 | 0,051±0,038 | 0,049±0,037 |
| c²parc | 0,016 | 0,015 | 0,006 |
| h²mc | 0,672 | 0,681 | 0,689 |
| Precisión | 0,819 | 0,825 | 0,830 |
| CVgi% | 5,208 | 2,716 | 1,661 |
| CVe% | 8,922 | 4,157 | 2,495 |
| CVr | 0,584 | 0,653 | 0,666 |
| PEV | 4,042 | 1,992 | 0,740 |
| SEP | 2,010 | 1,411 | 0,860 |
| Media general | 67,36 | 92,01 | 92,86 |

La variable volumen mostró valores de heredabilidad altos tanto en sentido individual como por clon. En el cuadro 7 se puede observar porcentajes de heredabilidad individual de hasta 22,4%, mostrando los valores más altos a los 4,7 y 5,8 años, es decir, previo al segundo raleo. Por otro lado la heredabilidad media del clon presentó valores elevados desde los 2,0 años de edad, logrando una heredabilidad máxima a los 4,7 años con 92,1%. El comportamiento de las heredabilidades para esta variable se puede observar mejor en la figura 3.

Además, en cuanto a la variación genética podemos observar que para todas las variables anteriormente analizadas los coeficientes estimados son bajos y no superan en ningún caso, el 7,4% de variación genética (Cuadros 4, 5 y 6). En cambio, en este caso, para la variable volumen, los coeficientes superan en todos los años el 10% de variación, alcanzando prácticamente un 18% de variación genética a los 6,7 años de edad (Cuadro 7).

Cuadro 7. Parámetros genéticos para la variable volumen comercial (m³) en 27 genotipos de teca (*Tectona grandis*) en seis mediciones distintas en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

| Edad (años) | 2,0 | 3,4 | 4,7 | 5,8 | 6,7 | 8,9 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Observaciones | 1272 | 1276 | 633 | 537 | 288 | 288 |
| Vg | 0,000005 | 0,0003 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Vparc | 0,000 | 0,00001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,003 |
| Ve | 0,00004 | 0,002 | 0,005 | 0,006 | 0,019 | 0,036 |
| Vf | 0,00005 | 0,002 | 0,007 | 0,008 | 0,022 | 0,041 |
| h²g | 0,113 ±0,027 | 0,137 ±0,029 | 0,224 ±0,053 | 0,214 ±0,056 | 0,113 ±0,056 | 0,050 ±0,037 |
| c²parc | 0,010 | 0,003 | 0,020 | 0,030 | 0,019 | 0,071 |
| h²mc | 0,874 | 0,902 | 0,921 | 0,895 | 0,830 | 0,598 |
| Precisión | 0,935 | 0,950 | 0,960 | 0,946 | 0,911 | 0,773 |
| CVgi% | 10,433 | 15,939 | 16,263 | 14,938 | 17,988 | 10,241 |
| CVe% | 9,691 | 12,850 | 11,640 | 11,420 | 18,197 | 18,780 |
| CVr | 1,077 | 1,240 | 1,397 | 1,308 | 0,989 | 0,545 |
| PEV | 0,000001 | 0,00003 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,001 |
| SEP | 0,001 | 0,005 | 0,011 | 0,013 | 0,020 | 0,029 |
| Media general | 0,022 | 0,105 | 0,236 | 0,276 | 0,275 | 0,441 |

Tal como se observó en los cuadros 4 y 7, la heredabilidad individual tanto para la variable DAP como para el volumen comercial registran un crecimiento progresivo de acuerdo con los años evaluados hasta alcanzar un punto máximo a los 4,7 años con 24,0% de heredabilidad en el caso del DAP y 22,4% para el volumen comercial; posterior a esto, en el siguiente año de evaluación (5,8 años) los valores tienden a estabilizarse registrando porcentajes similares, mostrando así como la heredabilidad expresa su máximo hasta una determinada edad (Figura 3). Además, se realizó la curva de mejor ajuste para el caso del diámetro ya que este presentaba un mayor registro de heredabilidades y se obtuvo que la función cuadrática de dicha curva describe en un 97,0% el comportamiento de la heredabilidad individual con relación en la edad.

En cuanto a la heredabilidad media por genotipo se observa un comportamiento similar en el tiempo, mostrando un incremento paulatino respecto a la edad hasta estabilizarse cerca

de su punto máximo que en este caso, al igual que en la heredabilidad individual, se encuentra a los 4,7 años con 92,6% y 92,1% para la variable DAP y volumen comercial respectivamente; sin embargo como se puede observar en la figura 3 desde los 2,0 años se registran porcentajes altos tanto para el DAP, como para el volumen comercial registrando valores que superan el 85%. De igual forma se estimó la curva de mejor ajuste para los datos de la variable DAP y se consiguió que la función polinomial describe en un 91,6% el comportamiento de la heredabilidad media del clon respecto a la edad.

En la figura 3 se omitieron los datos de las dos últimas edades de medición (6,7 y 8,9 años) ya que por razones de raleo, poco menos de la mitad de los genotipos fueron aprovechados comercialmente, esto generó que los parámetros genéticos de las heredabilidades disminuyera considerablemente (Cuadro 4 y 7).

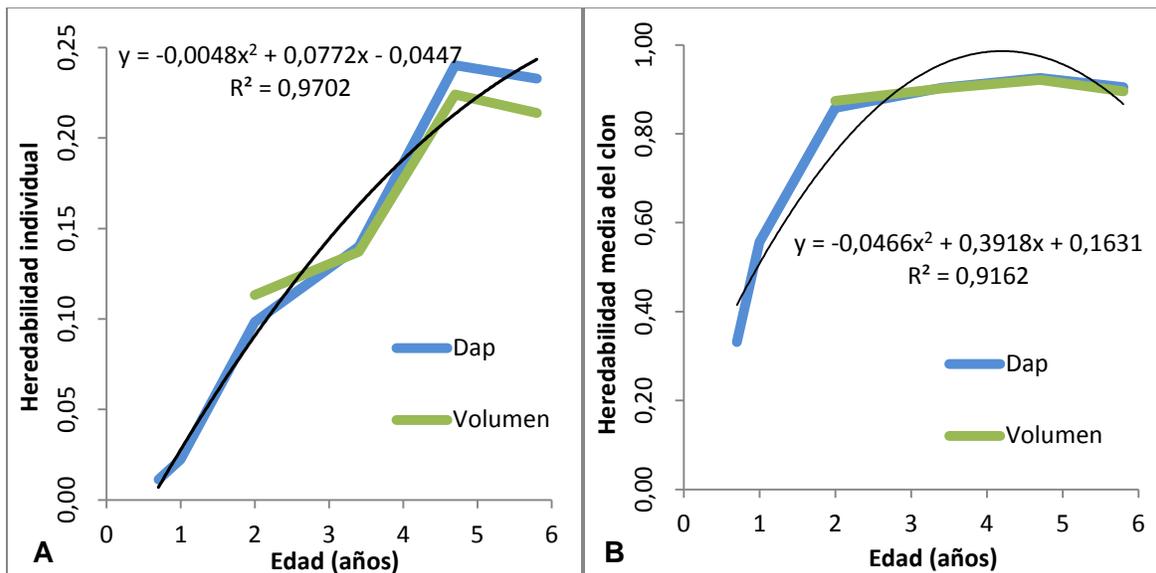


Figura 3. A. comportamiento de la heredabilidad del clon individual en sentido estricto; B. comportamiento de la heredabilidad media; ambas, en función de la edad para la variable DAP y volumen comercial en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

En el cuadro 8 al observar correlaciones entre variables semejantes, se aprecia que en el caso del DAP los dos primeros años de medición (0,7 y 1,0 años de edad) se correlacionan genéticamente entre sí en un 63%, sin embargo las correlaciones con los siguientes años en los que se evaluó esta variable dejaron de ser significativos. También entre los 2,0 años y 5,8 años de edad los diámetros mantienen correlaciones muy altas rondando entre 93% (entre los 2,0 años con 4,7 años y 5,8 años de edad) hasta 99% (entre los 4,7 años y 5,8 años de edad). Además, para la variable DAP se tiene que los



dos últimos años mantienen correlaciones genéticas entre sí del 100%, lo cual no sucede al comparar estos dos últimos respecto a los diámetros de años anteriores en donde se registran correlaciones máximas del 72%; este comportamiento coincide con el segundo raleo aplicado a los 6 años de edad.

Nuevamente, en este caso para la variable volumen comercial, se repite la tendencia seguida el DAP mostrando correlaciones altas entre años intermedios (de 2,0 años a 5,8 años de edad) en donde se registraron valores de correlaciones genéticas que oscilaron entre 90% (entre los 2,0 años respecto a 4,7 años y 5,8 años de edad) y 99% (entre 4,7 años y 5,8 años de edad). Además, también se siguió el mismo comportamiento para los dos últimos años de medición, los cuales tuvieron una correlación de 99% entre sí y una correlación máxima de 79% respecto a los años anteriores en los que se evaluó esta misma variable (Cuadro 8).

En resumen a partir de los tres anteriores casos se agrupan las edades de mediciones en tres rangos en donde las correlaciones fueron elevadas dentro de sí y disminuyeron al analizarlas respecto a los otros dos grupos de edades; estos rangos corresponden al primero a 0,7 años y 1,0 años de edad, el segundo entre los 2,0 años y 5,8 años de edad y el tercero a los 6,7 años y 8,9 años de edad, esto últimos concuerdan con las edades posteriores al segundo raleo, en el cual se eliminaron las 12 accesiones con menor valor comercial (incluyendo los dos testigos).

La variable daño por viento no mostró correlaciones significativas entre las dos edades en las que fue evaluada, el valor fue de 5%. Tampoco la calidad del fuste comercial a los 3,4 años mostró correlaciones significativas respecto a las calidades a los 6,7 y 8,9 años de edad, en ambos caso las correlaciones fueron de 15%. Mientras que la correlación entre calidades de las dos últimas mediciones fue sumamente alta con un valor de 100% (Cuadro 8).

Por otro lado, en el cuadro 8 se aprecia que en cuanto a correlaciones genéticas entre variables no semejantes como es de esperar, dentro de los rangos mencionados las variables cuantitativas mantuvieron correlaciones genéticas elevadas alcanzando valores superiores a 90% principalmente en las mediciones entre los 2,0 años y los 5,8 años de edad y entre los 6,7 años y los 8,9 años de edad.

Tanto las dos variables de daño por viento como la calidad general a los 3,4 años presentaron correlaciones no significativas respecto a variables no semejantes; en el caso

de daño por viento y la calidad a 3,4 años mostraron la mayor correlación al analizarlos entre sí, presentando un valor de 41%. En el caso del daño por viento a los 4,7 años también registro correlaciones no significativas respecto a las demás variables siendo las mayores con el DAP a 6,7 y 8,9 años y el volumen comercial a 8,9 años con un valor de tan solo 22% de correlación para los tres casos. En cuanto a las calidades a 6,7 y 8,9 años mostraron correlaciones significativas principalmente respecto a las variables cuantitativas a partir de los 2,0 años, presentando un aumento de dichos valores hasta alcanzar correlaciones genéticas de del 100% respecto a las variables evaluadas a 6,7 y 8,9 años a excepción del volumen comercial a 6,7 años con un valor de 98% para ambos casos (Cuadro 8).

Por último, cabe mencionar que las correlaciones para los años posterior al segundo raleo se mantuvieron sobre el 98% para cualquier combinación de variables dentro de estos dos años lo cual es sumamente alto (Cuadro 8). Esto indica que las variables analizadas mantienen comportamientos muy estables entre sí.

Cuadro 8. Matriz de correlaciones genéticas para un ensayo clonal de *Tectona grandis* con ocho mediciones en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

| Variable - Edad (años) | DAP 0,7 | DAP 1,0 | DAP 2,0 | Vol Com 2,0 | DAP 3,4 | Daño viento 3,4 | Calidad 3,4 | Vol Com 3,4 | DAP 4,7 | Daño viento 4,7 | Vol Com 4,7 | DAP 5,8 | Vol Com 5,8 | DAP 6,7 | Calidad 6,7 | Vol Com 6,7 | DAP 8,9 | Calidad 8,9 | Vol Com 8,9 |
|---------------------------|------------|-------------|------------|-------------------|-------------|-----------------------|----------------|-------------------|-------------|-----------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|----------------|-------------------|-------------|----------------|-------------------|
| DAP 0,7 | 1,00 | 0,63 | 0,35 | 0,40 | 0,29 | -0,04 | -0,18 | 0,34 | 0,32 | 0,19 | 0,34 | 0,30 | 0,31 | 0,26 | 0,25 | 0,29 | 0,26 | 0,25 | 0,26 |
| DAP 1,0 | | 1,00 | 0,25 | 0,28 | 0,22 | 0,14 | 0,28 | 0,24 | 0,15 | 0,11 | 0,17 | 0,11 | 0,12 | 0,08 | 0,07 | 0,14 | 0,07 | 0,06 | 0,11 |
| DAP 2,0 | | | 1,00 | 0,99 | 0,97 | 0,29 | 0,22 | 0,97 | 0,93 | 0,17 | 0,91 | 0,93 | 0,91 | 0,68 | 0,67 | 0,69 | 0,67 | 0,67 | 0,69 |
| VolCom 2,0 | | | | 1,00 | 0,95 | 0,26 | 0,19 | 0,96 | 0,92 | 0,17 | 0,90 | 0,92 | 0,90 | 0,68 | 0,68 | 0,70 | 0,68 | 0,68 | 0,69 |
| DAP 3,4 | | | | | 1,00 | 0,37 | 0,34 | 0,99 | 0,95 | 0,04 | 0,93 | 0,94 | 0,93 | 0,69 | 0,68 | 0,70 | 0,69 | 0,68 | 0,70 |
| Dviento 3,4 | | | | | | 1,00 | 0,41 | 0,35 | 0,38 | 0,05 | 0,40 | 0,33 | 0,35 | 0,29 | 0,28 | 0,33 | 0,29 | 0,28 | 0,31 |
| Calidad 3,4 | | | | | | | 1,00 | 0,29 | 0,21 | -0,13 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,17 |
| VolCom 3,4 | | | | | | | | 1,00 | 0,96 | 0,04 | 0,94 | 0,95 | 0,94 | 0,71 | 0,71 | 0,73 | 0,71 | 0,70 | 0,72 |
| DAP 4,7 | | | | | | | | | 1,00 | -0,02 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,72 | 0,71 | 0,76 | 0,72 | 0,71 | 0,74 |
| Dviento 4,7 | | | | | | | | | | 1,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,22 | 0,21 | 0,22 |
| VolCom 4,7 | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,74 | 0,73 | 0,79 | 0,74 | 0,73 | 0,76 |
| DAP 5,8 | | | | | | | | | | | | 1,00 | 1,00 | 0,71 | 0,70 | 0,74 | 0,71 | 0,70 | 0,72 |
| VolCom 5,8 | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,73 | 0,72 | 0,77 | 0,72 | 0,72 | 0,74 |
| DAP 6,7 | | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 1,00 | 0,98 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Calidad 6,7 | | | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,98 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| VolCom 6,7 | | | | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,98 | 0,98 | 0,99 |
| DAP 8,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Calidad 8,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 1,00 |
| VolCom 8,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1,00 |

Finalmente se realizó el ranking para la variable volumen comercial ya que esta es la que tiene, desde un punto de vista económico, mayor peso. Inicialmente se excluyeron las dos últimas mediciones ya que no contaban con todo el material clonal, posteriormente se compararon los años de medición restantes y se seleccionó el volumen a los 4,7 años de edad como el óptimo para representar el ranking para el ensayo; esto, por dos principales razones, los parámetros (principalmente las heredabilidades y la exactitud en estimación) eran los mayores al comparar entre todas las mediciones (Cuadro 7) y por otro lado, se encontraba dentro del rango en el cual ambas heredabilidades se habían estabilizado en el tiempo (Figura 3),

De tal forma que se estimó el ranking para las 27 accesiones evaluadas respecto a la variable volumen comercial a los 4,7 años de edad. Se encontró, como es de esperar, que el mejoramiento genético por medio de la propagación vegetativa proporciona mayores rendimientos en volumen comercial estimado respecto al material proveniente de semilla los cuales ocuparon la antepenúltima y última posición del ranking (Figura 4).

El promedio del valor genético para el ensayo corresponde a $0,236 \text{ m}^3$ por individuo en volumen comercial a los 4,7 años de edad; al comparar este promedio contra la media de los genotipos que ocupan las 10 primeras posiciones ($0,269 \text{ m}^3$ en promedio) se esperaría obtener un 14,2% de incremento en el volumen medio, y al compararlo respecto al genotipo que ocupa el primer lugar del ranking ($0,293 \text{ m}^3$) el incremento volumétrico esperado asciende a un 24,4%. Al hacer esta misma comparación respecto al material proveniente de semilla ($0,160 \text{ m}^3$ en promedio) obtenemos que al utilizar los primeros 10 genotipos del ranking la ganancia esperada es de 68,6% y al utilizar el clon número uno dicha ganancia en el volumen comercial esperado alcanza hasta un 83,7% (Figura 4).

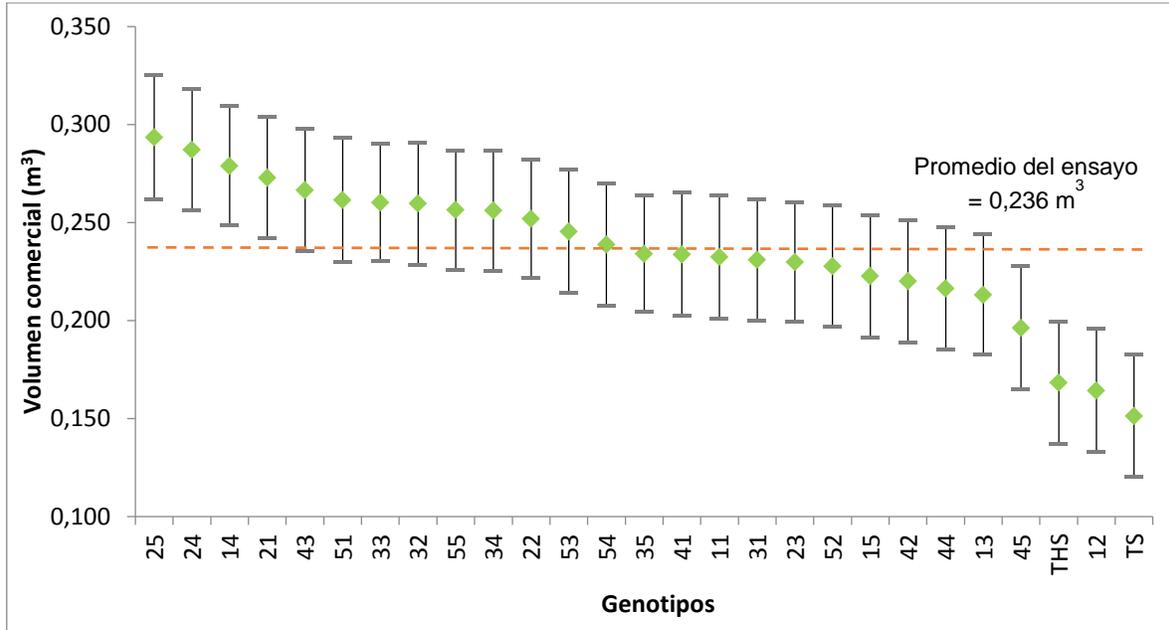


Figura 4. Ranking del valor genético del volumen comercial (m³) estimado a los 4,7 años para 27 genotipos de teca (*Tectona grandis*) en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

Partiendo de los valores genéticos determinados por SELEGEN-REML/BLUP para cada accesión, se determinó la ganancia genética esperada para los 10 mejores genotipos tanto para la variable DAP como para el volumen comercial por individuo. Dicha ganancias genéticas mostraron un incremento diamétrico a los 4,7 años de 1,1 cm respecto al promedio del ensayo y de 4,0 cm en relación a ambos testigos (lo cual corresponde a ganancias de 6,2% y 25,8% respectivamente); además en cuanto al volumen comercial, a la misma edad los 10 mejores genotipos mostraron 0,033 m³ más que todos los materiales evaluados y 0,110 m³ más respecto a los testigos; dichos valores representan ganancias de 14,2% y 68,6% respectivamente (Cuadro 9).

Por otro lado se estimó, con base en las ganancias genéticas obtenidas para la variable DAP a los 4,7 años que tomando como base un turno de rotación de 18 años; se espera que los 10 mejores clones alcancen la cosecha final 1,1 años antes que estableciendo todos los genotipos evaluados y 4,6 años antes que ambos testigos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Ganancia genética esperada si se selecciona los 10 mejores clones de teca (*Tectona grandis*) a los 4,7 años, respecto al promedio del ensayo y al promedio de los testigos en Osa, Pacífico Sur de Costa Rica.

| Población de referencia | DAP (cm) | Tiempo (años) que se reduce la cosecha final | Volumen comercial (m³) |
|--------------------------------|-----------------|---|--|
| Ensayo | 1,1 (6,2%) | 1,1 | 0,033 (14,2%) |
| Testigos | 4,0 (25,8%) | 4,6 | 0,110 (68,6%) |

DISCUSIÓN

Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Al analizar los parámetros genéticos de la variable DAP, se observa que tanto para la heredabilidad individual como para la heredabilidad media del clon, existe una mejoría en el tiempo, registrando valores inferiores a 2,2% de heredabilidad individual para los dos primeros años de medición y un valor de 33,1 en heredabilidad media del clon en la primer medición y alcanzando valores de hasta 24,0% en heredabilidad individual y 92,6% en heredabilidad media, ambos a los 4,7 años (Cuadro 4).

Parámetros genéticos bajos en edades tempranas son normales de observar; Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval (2015) mencionan que este tipo de resultados indican que tanto la corta edad como las condiciones de sitio pueden estar afectando el desarrollo y expresión del potencial genético del material evaluado. Por lo tanto, realizar selección genotípica a edades tempranas puede inducir a error ya que los individuos evaluados aún no han logrado expresar su potencial genético en forma clara.

Por lo tanto, esperar a años posteriores para la toma de decisiones es lo indicado, en este caso para la variable DAP los mayores valores para las heredabilidades se registran en ambos casos a los 4,7 años de edad (Cuadro 4), esto nos indica la edad adecuada para realizar dicha selección en función de esta variable ya que valores altos de heredabilidad contribuyen en con un buen potencial de selección (Pastrana, Espítia y Murillo 2012).

Además, Pastrana et al. (2012) mencionan que si se combinan estos valores de heredabilidad con una alta exactitud de los estimados, la selección se vuelve eficiente. Esto sucede en este caso, en donde a partir de 1,0 años de edad los valores de exactitud se mantiene altos (superando prácticamente el 75%) alcanzando un valor máximo a los 4,7 años (96,2%), edad a la cual las dos heredabilidades también fueron máximas (Cuadro 4).

Debido a la gran diversidad de condiciones ambientales dentro de las zonas de distribución natural de la teca, se presume que sea una especie con alta variabilidad genética (Fonseca 2004, Camino y Morales 2013). Sin embargo, tal como en este estudio, en América Central y Caribe la variabilidad genética se ha mostrado baja (Camino y Morales 2013) esto puede deberse a que en esta región la teca (*Tectona grandis*) corresponde a una especie introducida por lo cual, es de esperar que inicialmente el

material haya sido ingresado por medio de semillas provenientes de una o pocas regiones y de ahí se empezara a expandir el material por el país, lo que puede explicar la baja variabilidad genética mostrada en todos los años cuyos coeficientes no superan el 7,4%.

Finalmente, se identifica un descenso en todos los parámetros analizados en los últimos dos años de medición. La razón de este comportamiento es el tipo de raleo aplicado al ensayo a los seis años, en el cual se eliminaron los 12 genotipos que ocuparon las últimas posiciones en el ranking según la información obtenida con la medición a los 5,8 años; esta disminución de 27 a 15 accesiones implicó una disminución de la varianza genética y un aumento en la varianza residual (Cuadro 4) las cuales son variables implicadas en el cálculo de ambas heredabilidades.

Daño por viento

En cuanto a la variable daño por viento se observa una disminución en la heredabilidad individual pero principalmente en la heredabilidad media del clon pasando de un 60,4% en el primer año de medición a 44,7% en el segundo año de evaluación. Esta reducción en las heredabilidades coincide con el primer raleo aplicado al ensayo (el raleo fue del 50% sobre la masa remanente), en el cual se eliminó el individuo con menor valor comercial de cada pareja de rametos; esto implica que muchos árboles afectados por el viento fueron eliminados dejando en campo los árboles con menor afectación, por lo cual, al estimar los parámetros a los 4,7 años sobre los mejores representantes de cada genotipo, implicó en una disminución de ambas heredabilidades. Esta disminución de datos además de que para los 4,7 años se analizaran solo los mejores representantes de cada genotipo implicó en una disminución en la exactitud de la estimación de los parámetros pasando de 77,7% a los 3,4 años a 66,9% a los 4,7 años, aunque esta última aún es aceptable (Cuadro 5).

Respecto a cambios en los parámetros producto de los raleos, Pavlosky y Murillo (2013) similar a Salas, Murillo, Murillo y Ávila (2016) ,encontraron al igual que en este estudio, que luego del raleo, la heredabilidad de los caracteres cualitativos se vio reducida, esto debido a que en el raleo se eliminó de igual forma, al peor individuo (ya fuese en calidad o crecimiento) dentro de cada pareja de rametos, esto provocó una disminución del número de observaciones por familia, que como consecuencia redujo la variabilidad genética

dentro de cada familia, sin embargo el raleo no suele afectar significativamente el ranking genético de la respectiva variable..

Calidad de fuste comercial

La variable calidad en heredabilidad individual, presenta un crecimiento entre los 3,4 años y los 6,7 años de edad esto indica que en este lapso aún los genotipos no han expresado totalmente su potencial genético. Sin embargo posterior a esto, el comportamiento de dicha heredabilidad se estabiliza alcanzando una heredabilidad máxima a los 6,7 años con un valor de 5,1% el cual puede ser considerado como bajo. La razón de esta baja heredabilidad, es la poca variación genética para los 6,7 años y 8,9 años de edad (Cuadro 6), lo anterior debido al raleo aplicado a seis años en donde se eliminaron las 12 accesiones con menores rendimiento dasométricos y de calidad; por lo cual es destacable la importancia de conocer los valores de heredabilidad individual justo antes del raleo mencionado.

La heredabilidad media del genotipo para esta variable muestra valores aceptables y muy estables desde los 3,4 años hasta los 8,9 años variando desde 67,2% hasta 68,9% el cual es un rango muy pequeño (Cuadro 6). Esto indica que el ranking genético se ha mantenido estable en el tiempo, lo cual puede ser utilizado como base para realizar selección genética temprana según este parámetro (Pavlosky y Murillo, 2013).

Por otro lado, en el cuadro 6 se puede observar que para los tres años de evaluación se registraron coeficientes de variación genéticas bajos; esto es normal, ya que a pesar de que *Tectona grandis* es una especie con alta variabilidad genética dentro de las zonas de distribución natural (Fonseca, 2004, Camino y Morales, 2013); Camino y Morales (2013) mencionan que en América Central y Caribe la variabilidad genética se ha mostrado baja, lo anterior probablemente porque el material haya sido introducido por medio de pocas progenies. También cabe destacar como el raleo aplicado a los seis años generó una fuerte caída en la variación genética mostrando 5,2% de variación a los 3,4 años y descendiendo a 2,7 y 1,7 respectivamente en las dos mediciones posteriores al segundo raleo.

Volumen comercial

En cuanto a la variable volumen comercial, se puede apreciar un comportamiento de los parámetros genéticos similar al DAP; esta tendencia es de esperar ya que el volumen comercial fue estimado en gran medida por el respectivo diámetro. Por lo cual, al igual que para el diámetro, se puede apreciar que tanto para la heredabilidad individual como para la heredabilidad media por genotipo, se registra un aumento en los parámetros hasta estabilizarse entre el año 4,7 y 5,8 con 22,4% y 21,4% respectivamente para el caso de heredabilidad individual y 92,1% y 89,5% respectivamente para la heredabilidad media del clon (Cuadro 7 y Figura 3); posteriormente, a los 6,7 y 8,9 dichos parámetros decaen debido al segundo raleo realizado en el cual se eliminaron las 12 accesiones con menores rendimientos comerciales (ya sea por razones dasométricas o de calidad de fuste comercial); esto, tal como se mencionó anteriormente, implicó en un considerable aumento en la varianza por parcela (es decir, entre rametos de un mismo genotipo dentro del bloque) y la varianza residual las cuales son denominadores en el cálculo de dichas heredabilidades.

Excluyendo los dos últimos años de medición del análisis, se identifican la edad de 4,7 años seguida de 5,8 años, debido a los valores de heredabilidades registrados y el comportamiento de estas en el tiempo (Figura 3), como el rango de edades óptimas para la selección genética en ensayo clonales de teca (*Tectona grandis*) con fines comerciales.

Correlaciones genéticas entre caracteres

Los dos primeros años de medición no mantienen correlaciones significativas respecto a los demás años de evaluación (Cuadro 8) debido a que aún para las variables DAP (por condiciones de edad y de sitio) no han expresado su potencial genético (Ávila, et al. 2015), esto se puede comprobar observando los porcentajes de heredabilidad que se expresan a estas edades (Cuadro 4).

Posteriormente desde los 2,0 años hasta 5,8 años de edad se observó, al igual que en dos estudios realizados por Pavlosky y Murillo (2013 y 2014) que todos los caracteres cuantitativos estuvieron alta y positivamente correlacionados entre sí (Cuadro 8). Además, Pavlosky y Murillo (2013) en un ensayo genético de acacia (*Acacia mangium*) registraron que el DAP a 1 años de edad estuvo fuertemente relacionado con el DAP a los 4 años

(90% en correlación); en este caso, se observan correlaciones altas para el diámetro a partir de los 2,0 años, manteniendo correlaciones genéticas superiores a 93% con los diámetros a 3,4 años 4,7 años y 5,8 años de edad (Cuadro 8). Ante esto, los autores mencionan que el potencial de crecimiento diamétrico que exhiben los árboles se expresa desde temprana edad y se ha mantenido de manera robusta; esto permitiría realizar selección temprana en función del DAP (Pavlosky y Murillo 2013).

Al igual que el diámetro, el volumen comercial a partir de los 2,0 años hasta los 5,8 años de edad, mantiene correlaciones genéticas altas respecto a las demás variables cuantitativas principalmente respecto a los demás volúmenes comerciales (correlación superior a 90%) y los DAP (superior a 92%) (Cuadro 8), por lo cual, esto refuerza la idea de selección temprana mencionada por Pavlosky y Murillo (2013). Lo anterior indica que todas las variables cuantitativas mantienen crecimientos positivamente y en forma estable entre sí a partir de los 2 años de edad.

En un estudio sobre teca (*Tectona grandis*) clonal a los tres años Callister & Collins (2008) encontraron correlaciones positivas entre el volumen del árbol y la rectitud del tallo. En este caso, en el cuadro 8 se observa que las calidades a los 6,7 y 8,9 años mantuvieron de igual forma, correlaciones positivas respecto a las variables cuantitativas. Sin embargo las restantes variables cualitativas no mostraron correlaciones significativas respecto a las demás variables; una razón puede ser que por el hecho de ser variables cualitativas se prestan a un mayor sesgo ya que no pueden ser medidas en forma práctica, sino que son estimadas y dicha valoración dependió de criterio de las distintas personas que evaluaron el ensayo.

Posteriormente del segundo raleo (a los 6 años), al dejar en campo solo los 15 mejores genotipo observamos en el cuadro 8 que las correlaciones entre las variables se disparan alcanzando valores de correlación genética superiores a 98%. Es este punto se identifica que todas las variables se correlacionan alta y positivamente entre sí, por lo tanto se espera que los genotipos que registran los mayores DAP sean los mismos a los 6,7 años y a los 8,9 años de edad, además que correspondan también a los que presentan las mejores calidades de fuste y por ende mayor volumen comercial aprovechable, las cuales de características ideales cuando de producción comercial de madera se trata.

Ranking genético

Al observar los valores genéticos asignados por SELEGEN-REML/BLUP para la variable volumen comercial a los 4,7 años de edad, queda en evidencia las diferencias existentes entre genotipos y la superioridad de estos respecto a los testigos los cuales ocuparon la antepenúltima y última posición del ranking (Figura 4). Al observar diferencias tan marcadas entre las accesiones evaluadas (84% mayor volumen para el clon que ocupa la primera posición respecto a los dos testigos) se puede constatar que el sitio reúne las condiciones adecuadas para el crecimiento de esta especie, esto ya que el sitio permite que los clones evaluados expresen su potencial genético (Valerio, 1986. Ávila et al. 2015).

Es cierto que se estimó el ranking con la información volumétrica de la medición posterior al primer raleo (4 años), sin embargo a pesar de que esta actividad puede reducir los valores de los parámetros genéticos estimados por el programa, la aplicación de raleos no suele afectar significativamente el ranking (Pavloztsky y Murillo 2013). Es de esperar, que al eliminar el individuo dentro de cada pareja de rametos con menor valor comercial se descarten afectaciones ajenas a las genéticas como los son las condiciones ambientales o de manejo; de tal manera que al evaluar los mejores individuos de cada genotipo, la comparación entre valores genéticos sea equitativo entre clones.

Como se mencionó anteriormente, la ganancia genética del genotipo que ocupó la primera posición del ranking es de un 84% en volumen comercial promedio por individuo respecto a los dos testigos evaluados (Figura 4). Sin embargo, recomendar el establecimiento de plantaciones monoclonales con solo este genotipo podría repercutir negativamente ya que Salas et al. (2016) encontraron genotipos de melina (*Gmelina arborea*) tanto con alta como baja tolerancia a determinadas enfermedades lo cual indica que la resistencia a patógenos también puede estar bajo control genético. Es por esto, que en términos de producción comercial lo ideal sería utilizar varios genotipos que se encuentren entre las primeras posiciones del ranking. En este caso, al seleccionar los 10 mejores clones según su valor genético a los 4,7 años de edad se esperaría un incremento de producción volumétrica del 69% por individuo en relación al material proveniente de semilla.

La estimación del ranking en función de la variable volumen comercial por individuo a los 4,7 años de edad, fue precisa ya que con los valores altos de heredabilidad (individual de 22,4% y media del clon de 92,1%) se obtiene una mayor certeza y eficiencia de selección

(Salas et al. 2016) estos valores son respaldados por la exactitud de los estimados (96,0%) (Cuadro 7).

Cabe mencionar la importancia de estimar los rankings de forma más integral, formulando metodologías para estimar el volumen comercial tomando en cuenta la calidad general a pesar de que las calidades en este estudio mantuvieron correlaciones altas con las variables cuantitativas ya que en un estudio realizado por Ávila et al. (2015), se observó que la clasificación de los clones varió significativamente según la variable analizada, por lo cual, los genotipos expresaron valores más deseables en un carácter que en otro. Además, tomar en cuenta la mortalidad, cantidad de ramas, presencia de acanalamiento del fuste entre otras variables que tengan implicaciones económicas.

Ganancia genética

En cuanto a la ganancia genética mostrada por los 10 mejores genotipos, arroja datos muy satisfactorios en especial respecto a los testigos ya que con esto queda demostrada por mucho la superioridad en rendimiento volumétrico por el establecimiento de plantaciones clonales; lo anterior siempre y cuando como la selección de árboles plus como la evaluación de los genotipos sea realizada correctamente, ya que tanto Cornelius (1994) como Franzel, Jaenicke & Janssen (1996) afirman que la selección árboles con rendimiento comercialmente superiores podría ser ineficaz si no se realiza de forma adecuada, de tal forma que las ganancias genéticas logradas lleguen a ser cercanas a cero.

Realizar la selección genética con base en los 10 mejores clones mostró ganancias genéticas del 25,8% en DAP y 68,6% para el volumen comercial por individuo (Cuadro 9); sin embargo, es posible obtener mayores ganancias seleccionando un grupo menor de los mejores clones ya que dicha ganancia depende de la intensidad de la selección, la variación genética y la heredabilidad de las variables evaluadas (Cornelius, 1994); ante esto, Balcorta y Vargas (2004) mencionan que el genetista no puede manipular la heredabilidad, pero pueden trabajar con la intensidad de selección para incrementar ganancias. Sin embargo, en contraposición a la selección de pocos genotipos con el objetivo de aumentar la ganancia genética, Salas et al., (2016) encontraron genotipos de melina (*Gmelina arborea*) tanto con alta como baja tolerancia a determinadas

enfermedades, por lo cual es de esperar que este factor se encuentre bajo control genético; por lo tanto, establecer plantaciones comerciales con pocos genotipos, además de reducir la variación genética, sería de alto riesgo ante la incidencia de patógenos si dichos clones no han sido adecuadamente evaluados en este aspecto.

Con relación a la ganancia mostrada en tiempo por los 10 mejores genotipos respecto a la cosecha final, se encontró que asumiendo un turno de rotación de 18 años, se espera una ganancia de 1,1 años respecto a la implementación de todas las accesiones evaluadas y 4,6 años respecto a los testigos (Cuadro 9); es decir, esperando a una cosecha final de 18 años en plantaciones establecidas con semilla cuyo origen sea el mismo que los testigos, al establecer los 10 mejores clones identificados en este estudio, esa cosecha se reduciría a 13,4 años. Ante esto, Cornelius (1994) menciona que se podría esperar que las ganancias aumenten con la edad, en la medida en que el material evaluado exprese con mayor claridad el potencial genético, esto ya que hay que recordar que la estimación se realizó con información obtenida a los 4,7 años.

CONCLUSIONES

Tanto para el DAP, como para el volumen comercial, ambas heredabilidades tienden a estabilizarse entre los 4,7 años y los 5,8 años. Por lo cual, bajo las condiciones en las cuales se ha encontrado el ensayo, se recomienda una edad cercana a los 5 años como adecuada para realizar la selección genotípica.

Tanto el DAP, como el volumen comercial y daño por viento, registraron un efecto negativo en sus parámetros genéticos producto del segundo raleo genético.

A partir de los 6,7 años se puede garantizar una adecuada selección genética con base en la calidad de fuste, sin embargo, es posible que la edad óptima sea menor, ya que en este estudio no se contó con información sobre calidad entre los 3,4 años y los 6,7 años de edad.

Las evaluaciones a los 0,7 años y 1,0 años de edad muestran que aún no se exhibe su verdadero potencial genético, en particular para caracteres cuantitativos. Por tanto, no debe realizarse selección genotípica a tan temprana edad.

A partir de los 2,0 años hasta los 5,8 años las variables cuantitativas se mantienen alta y positivamente correlacionadas entre sí. Esto indica que a nivel de ranking los cambios son pequeños en este lapso.

El mejor clon a nivel de ranking registra un valor genético en volumen de $0,293 \text{ m}^3$ por individuo a los 4,7 años, esto corresponde a un incremento del 24,4% respecto al promedio de ensayo y de 83,7% respecto al material testigo proveniente de semilla.

Los 10 mejores genotipos en el ranking genético del volumen comercial a los 4,7 años, mantienen un valor genético promedio de $0,269 \text{ m}^3$ por individuo, que corresponde a una ganancia del 14,1% en relación a la media poblacional y 68,6% respecto al material testigo proveniente de semilla.

La ganancia genética a los 4,7 años de edad con la utilización de los 10 mejores genotipos, implicaría un incremento de 25,8% en DAP y 68,6% para el volumen comercial con respecto al uso de semilla comercial.

A partir de la información a la edad de 4,7 años y asumiendo una cosecha final de 18 años, se espera que los 10 mejores clones alcancen el diámetro esperado al turno de

rotación 4,6 años antes que los testigos. Se puede también mencionar que esta ganancia en tiempo de cosecha se amplíe con la edad.

Capítulo II.

Interacción genotipo-ambiente en ensayos clonales de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Costa Rica y Panamá

RESUMEN

En producción comercial de *Tectona grandis*, especie que ocupa un 74% de la superficie mundial plantada con madera tropical dura de alto valor; la identificación de genotipos superiores supone un método eficiente con el cual incrementar el rendimiento de plantaciones. En este estudio se evaluaron dos ensayos clonales en ambientes distintos con el objetivo de determinar la interacción genotipo-ambiente de los clones evaluados. De lo anterior, se encontró que en el caso del ensayo de Panamá a los 5,9 años de edad en volumen comercial por árbol no se registraron diferencias significativas entre accesiones; además, a esta edad, los 10 mejores genotipos mostraron una ganancia genética de 4,6% en diámetro a la altura del pecho (DAP) y de 9,3% en volumen comercial por individuo respecto al uso de semilla; partiendo de información diamétrica, se estimó una ganancia en tiempo para la cosecha final de 0,8 años al establecer los 10 mejores genotipos respecto a semilla, lo anterior, tomando como base turnos de rotación de 18 años. En el ensayo de Costa Rica, a partir de los 3,0 años de edad las heredabilidades (tanto media del clon como individual) se estabilizan, lo que indica la posibilidad de realizar selección genotípica temprana; por otro lado, a los 5,4 años se registraron en volumen comercial por individuo, diferencias altamente significativas entre las accesiones. La ganancia genética mostrada por los 10 mejores clones, al compararlos con los testigos, fue de 33,0% en DAP y 88,7% en volumen comercial por individuo, la ganancia en tiempo para la cosecha final fue de 5,9 años respecto a los testigos.

La interacción genotipo-ambiente indicó la presencia de clones estables en ambientes diferentes con alto rendimiento volumétrico, estos corresponden a los clones 24, 22, 26, 27, 29 y 18, así mismo, se identificaron genotipos con bajo rendimiento en ambos sitios los cuales fueron los clones 8, 19 y en mayor medida el 7. Además, se encontraron genotipos con una fuerte interacción genotipo-ambiente, los cuales mantuvieron rendimientos volumétricos muy contrastantes en ambos ensayos evaluados.

Palabras clave: Mejoramiento genético, silvicultura clonal, Interacción genotipo-ambiente, teca, Costa Rica, Panamá.

ABSTRACT

In commercial production of *Tectona grandis*, a species that occupies 74% of the world surface planted with hard tropical wood of high value; The identification of superior genotypes supposes an efficient method with which to increase the yield of plantations. In this study two clonal tests were evaluated in different environments with the objective of determining the genotype-environment interaction of the clones evaluated. From the above, it was found that in the case of the Panama test at 5.9 years of age in commercial volume per tree, there were no significant differences between accessions; In addition, at this age, the 10 best genotypes showed a genetic gain of 4.6% in diameter at breast height (DBH) and 9.3% in commercial volume per individual with respect to seed use; Based on diametric information, a gain in time for the final harvest of 0.8 years was estimated in establishing the 10 best genotypes with respect to seed, based on rotational shifts of 18 years. In Costa Rica, from the age of 3.0 the heritabilities (both clone mean and individual) are stabilized, indicating the possibility of early genotypic selection; On the other hand, at 5.4 years were recorded in commercial volume per individual, highly significant differences between the accessions. The genetic gain shown by the 10 best clones when compared to the controls was 33.0% in DBH and 88.7% in commercial volume per individual, the gain in time for the final harvest was 5.9 years To witnesses.

The genotype-environment interaction indicated the presence of stable clones in different environments with high volumetric yield, these correspond to clones 24, 22, 26, 27, 29 and 18, and genotypes with low yield were identified in both sites Were clones 8, 19 and to a greater extent 7. In addition, genotypes with a strong genotype-environment interaction were found, which maintained very contrasting volumetric yields in both trials evaluated.

Keywords: Tree improvement, clonal forestry, genotype-environment interaction, teak, Costa Rica, Panama.

INTRODUCCIÓN

La teca (*Tectona grandis*) es una especie originaria del sureste asiático específicamente de la India, de donde posteriormente se extendió al este (Hansen, Changtragoon, Ponoy, Kjær, Minn, Finkeldey, Nielsen & Graudal, 2015). Los sitios óptimos para la especie mantienen elevaciones inferiores a 500 msnm, una estación seca marcada, la cual abarca de entre 4 a 6 meses, la temperatura media anual óptima se encuentra entre 23 y 27 °C y las precipitaciones anuales entre los 1300 y 2500 mm (Fonseca 2004).

Su madera ha ganado una reconocida reputación a nivel mundial dado a su alta calidad, por su atractivo y durabilidad, y buena trabajabilidad, además, posee alta resistencia al ataque de patógenos, por sus excelentes características, se considera como una de las más valiosas del mundo (Fonseca, 2004, Camino y Morales, 2013).

Actualmente la teca (*Tectona grandis*) representa el 74% del área plantada a nivel mundial con maderas duras tropicales de alto valor, lo cual la coloca como la especie cultivada de mayor importancia en esta categoría. Sin embargo la madera de esta especie se considera como un recurso aún emergente el cual se espera que continúe en crecimiento; además, mantiene una demanda latente insatisfecha, aunque difícil de calcular (Camino y Morales, 2013).

Camino y Morales (2013) también mencionan que la teca (*Tectona grandis*) satisface una fracción de la demanda total de maderas duras tropicales (aproximadamente 3 millones m³ de un total de 90 millones de m³). Sin embargo, el problema oscila en que la mayor parte de este tipo de madera proviene de fuentes no sostenibles las cuales cada vez van siendo más escasas, esto en el futuro, generará un aumento en la presión sobre la oferta de materia prima proveniente de plantaciones y otras fuentes sostenibles. Por lo cual se hace notar la necesidad de establecimiento de este tipo de plantaciones que actualmente goza de una excelente demanda y es de esperar que en un futuro se vea incrementado.

A nivel de Centroamérica, Costa Rica ha sido el país que ha liderado el desarrollo de las plantaciones; sin embargo en los últimos años, Panamá ha sido quien ha registrado la mayor extensión plantada. Ambos países, así como otros importantes productores de esta especie, han encontrado el éxito de sus plantaciones en gran medida debido a que han utilizado a la selección mediante programas de mejoramiento genético como herramienta básica para identificar individuos con rendimiento comercial superior (Camino y Morales, 2013).

Ante esto, Murillo y Badilla (2004a) mencionan que para convertir la actividad forestal en un proceso productivo rentable y seguro es necesario desarrollar programas de mejoramiento, que conlleven a la generación de materia prima de mayor calidad, con el menor costo posible.

Proyectos de mayor tamaño y experiencia mantienen programas de mejoramiento genético para la selección de material procedente de árboles plus cuidadosamente seleccionados; estos proyectos mantienen una base de clones, los cuales se van remplazando por otros nuevos, según su desempeño en el campo (Camino y Morales, 2013).

Una técnica adecuada para evaluar el desempeño de genotipos son los ensayos genéticos. El propósito de estos es ofrecer una herramienta confiable para seleccionar de manera eficiente los mejores genotipos mediante la separación de los efectos genéticos de los ambientales; para ello es necesario estimar parámetros genéticos en la población de mejoramiento genético bajo evaluación garantizando así una adecuada selección de individuos con superioridad genética en características comercialmente deseables (Espitia, Murillo, Castillo, Araméndiz y Paternina, 2010, Pavlotzky y Murillo, 2012, Pavlotzky y Murillo, 2014).

Con la colaboración de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) fundada por Murillo en el 2000 (Murillo, 2007), la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A. ha generado un programa de mejoramiento genético para teca (*Tectona grandis*) y otras especies forestales; estableciendo ensayos genéticos tanto en Costa Rica como en Panamá. Dicho programa ha permitido a esta empresa identificar y evaluar más de 30 genotipos de *Tectona grandis* con rendimientos comercialmente deseables. En este estudio se estableció como objetivo determinar la interacción genotipo ambiente para dos ensayos establecidos por la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A. en Panamá y Costa Rica.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de sitios

Los ensayos clonales evaluados fueron establecidos en agosto del 2010, estos ensayos comparten 32 accesiones (31 genotipos y el testigo proveniente del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha). El primer ensayo se ubica en la Finca La Loma en el corregimiento de Agua Fría, Darién, Panamá; la zona de vida según Holdrige corresponde a bosque húmedo tropical, la precipitación media es de 2250 mm anual. El ensayo se ubica en sitios plano-ondulados con pendientes que no superan el 10°, se encuentra rodeado por plantaciones principalmente de Teca, parches de bosque y terrenos pecuarios. El segundo ensayo se estableció en Puerto Escondido de Osa, Puntarenas, Costa Rica; la ubicación geográfica corresponde a 8°39'45,14" norte y 83°28'14,07" oeste, la zona de vida concuerda con bosque muy húmedo premontano transición basal, la elevación promedio sobre el nivel del mar es de 16 m; de igual forma la precipitación media es de 3701 mm y la temperatura es de 25,8 °C (Fallas, Valverde, 2009); el ensayo se encuentra en sitios planos, rodeado por áreas dedicados al pastoreo de ganado y parches de bosque.



Figura 5. A. ensayo clonal de *Tectona grandis* en La Loma, Agua fría Darién, Panamá. B. ensayo clonal de *Tectona grandis* en Puerto Escondido, Osa, Puntarenas, Costa Rica.

Descripción del material

Los genotipos evaluados corresponden a los 31 clones en el caso del ensayo de Panamá y 33 clones en el ensayo de Costa Rica; este material corresponde a los mejores genotipos identificados por la empresa Brinkman Asociados Reforestadores de Centroamérica, S.A. (BARCA). Ambos ensayos también contienen dos accesiones referentes a testigos; en el caso de Panamá ambos controles corresponden a semilla del Centro Agrícola Cantonal de Hojanha (CACH), Guanacaste, Costa Rica. En el caso de Costa Rica el primer testigo corresponde a semilla proveniente de Guanacaste del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) y el segundo testigo es semilla proveniente del Centro Agrícola Cantonal de Hojanha (CACH), Guanacaste. Además, dentro de cada bloque en ambos ensayos se encuentran parejas de árboles de origen desconocido utilizados como relleno, los cuales se omitieron en el análisis de este estudio.

Diseño Experimental

Ambos ensayos fueron establecidos con un diseño de bloques completos al azar propuesto por GENFORES (Murillo & Badilla, 2004b), el cual divide los ensayos en seis bloques, dentro de los cuales existen inicialmente tres parejas (parcela) por accesión distribuidos aleatoriamente y separados espacialmente entre sí. Además, se mantuvo al menos una franja mínima de dos árboles de acho en el límite del ensayo con el fin de minimizar el efecto de borde. Ambos ensayos se sembraron a una densidad inicial de 1111 árboles por hectárea.

En el ensayo de Panamá, se evaluaron 33 accesiones, cada uno representado por seis árboles en cada bloque, para un total de 1188 individuos en todo el ensayo. Para el caso del ensayo en Costa Rica, se evaluaron 35 accesiones, representado por seis árboles en cada bloque y un total de 1260 individuos para el ensayo.

Previo al análisis, se depuró la base de datos, donde se eliminó inconsistencias entre las mediciones anteriores y entre los valores reportados en crecimiento para una edad determinada. Además, cabe mencionar que se estableció una franja mínima de dos árboles de acho en el límite del ensayo con el fin de minimizar el efecto de borde (Figura 6).

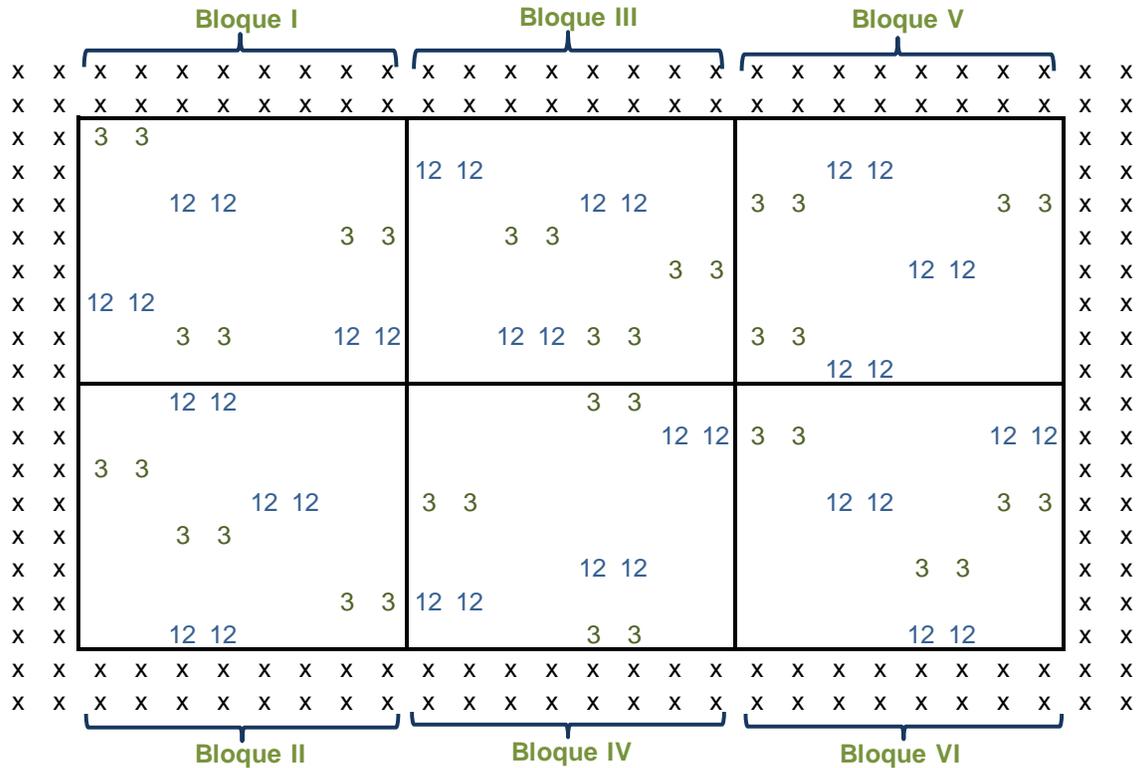


Figura 6. Diseño GENFORES para la evaluación genotípica de accesiones, basado en 2 ó 3 parejas de individuos (parcela) distribuidas aleatoriamente dentro de cada uno de los seis bloques (Murillo & Badilla, 2004b).

Los ensayos fueron establecidos bajo metodologías semejantes a las utilizadas por la empresa en plantaciones comerciales; así mismo el manejo brindado se ha realizado de forma análoga al resto del área forestal. El ensayo de Panamá recibió un raleo del 50% aproximadamente a los 3 años de edad en el cual se seleccionó el árbol con menor valor comercial dentro cada pareja de rametos para ser eliminado; posteriormente, a los 5 años se realizó un segundo raleo en el cual se eliminó el 33% de la masa forestal con menor valor comercial. Por otro lado, el ensayo de Costa Rica a la fecha de medición (aproximadamente 5,4 años) no había recibido ningún tipo podas ni raleos, además no se tiene registro sobre enmiendas aplicadas.

Recolección de datos

El ensayo de Panamá se midió a los 1,8 años, 3,5 años y 5,9 años; mientras que el de Costa Rica se midió a los 3 años y a los 5,4 años.

La identificación de los individuos se realizó con apoyo de croquis y como información de campo, se recolectó el DAP, altura total en la primera medición del ensayo de Panamá), presencia de daño al viento y la calidad de cada troza comercial (2.5 m de longitud) en una escala del uno al cuatro, siendo 1 para describir a trozas con pocos o ningún defecto y 4 para describir las trozas que registran los mayores defectos; de manera adicional se registró el número de la fila dentro de cada bloque, código del clon según el croquis del ensayo y un consecutivo dentro de cada bloque. Cada árbol fue marcado (y remarcado cuando fuese necesario) con el código del clon y el punto de medición del diámetro para facilitar su identificación y estandarizar la altura a la cual se realizaba la medición.

Análisis de los datos

Para realizar el análisis de los datos recolectados, fue necesario unificar las bases de datos de mediciones pasadas con las actuales de tal manera que cada individuo contara con la información recolectada en todas las mediciones, de esta forma se podría evaluar el comportamiento de las variables de interés a través del tiempo.

Una vez unificadas las bases de datos, se estimó la calidad general de cada individuo según la cantidad de trozas comerciales estimadas y las respectivas calificaciones asignadas a cada troza (Cuadro 10).

Cuadro 10. Estimación de la calidad general del árbol, basada en el aporte individual de sus primeras trozas comerciales (Murillo y Badilla, 2004a).

| Cantidad de trozas | Primer troza | Segunda troza | Tercera troza | Cuarta troza | Quinta troza |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| 1 | 1,00 | | | | |
| 2 | 0,60 | 0,40 | | | |
| 3 | 0,45 | 0,33 | 0,22 | | |
| 4 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 0,10 | |
| 5 | 0,35 | 0,25 | 0,20 | 0,15 | 0,05 |

En la ecuación 4 se muestra el ejemplo para calcular la calidad general en escala de 1 a 4 de un individuo cuyo fuste cuenta con cuatro trozas comerciales.

$$Calidad\ general = T1 * 0,40 + T2 * 0,30 + T3 * 0,20 + T4 * 0,10 \quad (4)$$

Dónde:

T1, T2, T3 y T4: Calidades (en escala de 1 a 4) asignadas a cada toza.

Luego de obtener la calidad general de cada individuo, se calculó la calidad porcentual mediante la ecuación 5.

$$Calidad\ (\%) = 100 * \left[1 - \left(\frac{calidad\ general - 1}{3} \right) \right] \quad (5)$$

Además, a partir de los diámetros recolectados, se estimó el volumen comercial hasta un diámetro mínimo de 5 cm calculado con el programa Avalúos Forestales en Excel creado por Murillo y Badilla (2011). Este programa utiliza un modelo específico para estimar el volumen de *Tectona grandis* aplicando un coeficiente de reducción dependiendo del DAP, lo anterior a partir de recolección de perfiles de fuste en plantaciones en Costa Rica (Murillo y Badilla 2011). Dicho software estima el volumen hasta toparse con una de tres condiciones relacionadas a la longitud del fuste comercial: la altura total, el número de trozas comerciales o el diámetro mínimo; en este caso, el volumen fue estimado hasta un diámetro mínimo de 5 cm.

Posteriormente se procedió a estandarizar la base en Excel y se analizaron los dos ensayos en forma individual mediante el programa de SELEGEN-REML/BLUP. Este software utiliza los procedimientos de Máxima Verosimilitud Restringida Lineal (REML) y Mejor Predicción Linear No Sesgada (BLUP) (Avila, Salas y Murillo, 2016). La ventaja de estos dos procesos es que manejan con mayor eficiencia las bases de datos no balanceadas, para la generación de parámetros estadísticos (componentes de varianza) sin sesgo (Resende, 2006).

El estadístico utilizado para evaluar individualmente cada ensayo clonal corresponde al modelo 2 (Bloques al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela) del software SELEGEN-REML/BLUP cuyo estadístico se describe en la ecuación (6). La descripción de los parámetros generados por el programa mediante este modelo se presentan en el cuadro 11.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (6)$$

Donde “y” es el vector de datos, es decir, la variable de respuesta; “r” es el vector de los efectos de la repetición, en esta caso el bloque (asumido como fijo); “g” es el vector de los efectos genéticos, el clon (asumido como aleatorio); “p” es el vector de los efectos de la parcela, lo que se refiere a la unidad experimental (asumido como aleatorio); “e” es el vector del error de los residuos (asumido como aleatorio); Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia de efectos identificados (Resende, 2006).

Mediante este modelo se realizó el análisis de las variables en forma individuales para obtener los parámetros genéticos para cada variable así como el ranking respectivo de los genotipos evaluados. Posteriormente, se analizaron las variables de cada ensayo en conjunto por medio del modelo 102 de SELEGEN-REML/BLUP para generar matrices de correlaciones genéticas (edad-edad) entre todas las variables analizadas en cada ensayo.

Además, partiendo de los valores genéticos estimados por SELEGEN-REML/BLUP para cada genotipo, se realizó el ranking genético de cada ensayo en función del volumen comercial por individuo del último año de medición (5,9 años el de Panamá y 5,4 años el de Costa Rica). Así mismo, se estimó la ganancia genética tanto en DAP como volumen comercial de los 10 mejores clones respecto al promedio del ensayo y los testigos. Finalmente, con la información anteriormente mencionada se proyectó la ganancia en edad de cosecha final tomando como referencia un turno de rotación de 18 años.

Para determinar la interacción genotipo-ambiente se utilizó la información de los dos ensayos en su última medición y se analizaron las variables DAP y volumen comercial de ambos sitios en conjunto. Para este tipo de análisis fue necesario agregar una nueva interacción (localidad) a la base de datos.

En este caso el estadístico a utilizar corresponde al modelo 3 (Bloques al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela, distintas localidades) del software SELEGEN-REML/BLUP cuyo estadístico se describe en la ecuación (7). La descripción de los parámetros generados por el programa mediante este modelo se presentan en el cuadro 11.

$$y = Xr + Zg + Wp + Ti + e \quad (7)$$

Donde “y” es el vector de datos, es decir, la variable de respuesta; “r” es el vector de los efectos de la repetición, en esta caso el bloque (asumido como fijo); “g” es el vector de los efectos genéticos, el clon (asumido como aleatorio); “p” es el vector de los efectos de la

parcela, lo que se refiere a la unidad experimental (asumido como aleatorio); “e” es el vector del error de los residuos (asumido como aleatorio); “i” es el vector de los efectos genotipo-ambiente (también asumido como aleatorio); y las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia de efectos identificados (Resende, 2006).

Cuadro 11. Descripción de los parámetros generados por SELEGEN-REML/BLUP mediante el modelo 2 y 3.

| Parámetro | Descripción |
|-------------------------------------|---|
| Vg | Varianza genética |
| V_{parc} | Varianza ambiental entre parcela |
| V_{int} | Varianza de la interacción genotipo-ambiente |
| Ve | Varianza residual o no explicada por el modelo |
| Vf | Varianza fenotípica total = $Vg + V_{parc} + Ve$ |
| h²_g | Heredabilidad individual en sentido estricto |
| c²_{parc} | Coefficiente de determinación de la parcela |
| c²_{int} | Coefficiente de determinación de los efectos de interacción genotipo-ambiente |
| h²_{mc} | Heredabilidad media de los genotipos |
| Precisión | Exactitud en la estimación de los parámetros |
| r_{loc} | Correlación genética entre localidades |
| CV_{gi}% | Coefficiente de variación genética |
| CV_e% | Coefficiente de variación experimental |
| CV_r | Coefficiente de variación relativa |
| PEV | Varianza del error de predicción de los valores genotípicos |
| SEP | Desviación estándar del valor genotípico de cada clon |

Para corroborar la información mostrada por los parámetros genéticos se seleccionó la variable que mejor comportamiento mantuvo en los sitios unificados y se compararon los rankings de los dos sitios individuales. Para ello, de cada ranking por separado se tomó el rango valores genéticos (es decir, desde el mayor hasta menor valor genético registrado) y se seccionó en tres partes iguales (alto, medio y bajo rendimiento de acuerdo a la variable). Así que se analizó la ubicación de los genotipos en los tercios de ranking entre ambos sitios de tal manera que se identificase la estabilidad o inconsistencia de las posiciones de los clones entre ambas localidades.

RESULTADOS

Inicialmente se analizó el ensayo de Panamá en el programa SELEGEN-REML/BLUP. En el caso de este ensayo se analizaron 11 variables distribuidas en tres mediciones distintas (1,8 años, 3,5 años y 5,9 años de edad). De estas variables solo se consideraron en este estudio aquellas cuyos parámetros fueron estimados con una precisión superior a 0,5, con esto se garantiza una evaluación eficiente de las variables seleccionadas.

Como se puede observar en el cuadro 12, cinco de las 11 variables evaluadas fueron analizadas con valores que superan 0,85 de precisión, sin embargo los parámetros genéticos de cuatro variables no fueron estimados con la precisión establecida como aceptable ($>0,5$); estas variables corresponden a DAP a 1,8 años, volumen comercial a 1,8 años. Daño por viento a 3,5 años y calidad del fuste comercial a los 5,9 años; por lo tanto, estas variables fueron omitidas de este estudio.

Cuadro 12. Precisión de la estimación de los parámetros genéticos de las variables evaluadas en 3 mediciones del ensayo clonal de *Tectona grandis* en Agua Fría, Darién, Panamá.

| Edad (años) | DAP | Altura | Daño viento | Calidad | Volumen comercial |
|-------------|------|--------|-------------|---------|-------------------|
| 1,8 | 0,41 | 0,76 | | | 0,25 |
| 3,5 | 0,85 | | 0,22 | 0,88 | 0,87 |
| 5,9 | 0,89 | | 0,54 | 0,38 | 0,87 |

En cuanto a la heredabilidad individual para las 7 variables tomadas en cuenta en este trabajo, se identifica que para la mayoría de variables los valores son bajos, a excepción del DAP a los 5,9 años en el cual se registra una heredabilidad del 9,0%; sin embargo, se puede observar que este parámetro mejora con el tiempo al comparar variables semejantes, como lo es el caso del DAP a los 3,5 años y 5,9 años de edad y el volumen comercial igualmente a los 3,5 años y 5,9 años de edad (Cuadro 13).

En el caso de la heredabilidad media del clon los parámetros mejoran considerablemente presentando heredabilidades superiores al 57% a excepción de daño por viento a los 5,9 años que mostró una heredabilidad del 28,8%. Por otro lado, al analizar heredabilidades medias por genotipo entre variables similares en el tiempo (DAP a los 3,5 años y 5,9 años de edad y el volumen comercial igualmente a los 3,5 años y 5,9 años de edad)

observamos que dicho parámetro aún registra un incremento para ambos casos en este lapso de aproximadamente 2,4 años (Cuadro 13).

Los comportamientos de ambas heredabilidades en el tiempo, tanto para DAP como para volumen comercial se pueden apreciar mejor en la figura 7.

En cuanto a la variación genética se tiene que para todas las variables evaluadas los coeficientes son bajos alcanzando el mayor valor con el volumen comercial a los 3,5 años de edad con un coeficiente de aproximadamente 7,6% (Cuadro 13). Al observar el comportamiento de este parámetro en el tiempo se puede apreciar una disminución en la variabilidad genética tanto en el caso del DAP como en volumen comercial.

Cuadro 13. Parámetros genéticos de un ensayo clonal con 33 genotipos en tres mediciones en Agua Fría, Darién, Panamá.

| Variable Edad (años) | Altura 1,8 | DAP 3,5 | Calidad 3,5 | Volumen comercial 3,5 | DAP 5,9 | Daño viento 5,9 | Volumen comercial 5,9 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|
| Observaciones | 1089 | 578 | 579 | 578 | 388 | 388 | 388 |
| Vg | 0,035 | 0,148 | 16,828 | 0,00003 | 0,321 | 0,001 | 0,0003 |
| Vparc | 0,015 | 0,015 | 1,321 | 0,000004 | 0,117 | 0,004 | 0,0001 |
| Ve | 1,109 | 2,534 | 217,742 | 0,0004 | 3,124 | 0,047 | 0,004 |
| Vf | 1,159 | 2,698 | 235,891 | 0,0005 | 3,562 | 0,052 | 0,004 |
| h²g | 0,030 ±0,015 | 0,055 ±0,028 | 0,071 ±0,031 | 0,061 ±0,029 | 0,090 ±0,043 | 0,013 ±0,017 | 0,071 ±0,038 |
| c²parc | 0,013 | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,033 | 0,084 | 0,019 |
| h²mc | 0,578 | 0,729 | 0,780 | 0,748 | 0,791 | 0,288 | 0,762 |
| Precisión | 0,760 | 0,854 | 0,883 | 0,865 | 0,889 | 0,537 | 0,873 |
| CVgi% | 3,800 | 3,075 | 5,490 | 7,578 | 2,814 | 1,347 | 6,379 |
| CVe% | 7,948 | 4,596 | 7,150 | 10,779 | 3,541 | 5,185 | 8,743 |
| CVr | 0,478 | 0,669 | 0,768 | 0,703 | 0,795 | 0,260 | 0,730 |
| PEV | 0,015 | 0,040 | 3,708 | 0,00001 | 0,067 | 0,0005 | 0,0001 |
| SEP | 0,122 | 0,201 | 1,926 | 0,003 | 0,259 | 0,022 | 0,009 |
| Media general | 4,93 | 12,53 | 74,72 | 0,070 | 20,12 | 1,94 | 0,273 |

En la figura 7 se puede apreciar claramente el comportamiento de las heredabilidades (individual y media del clon) en el tiempo tanto para el DAP, como para el volumen comercial. Según este comportamiento, ambas heredabilidades entre los 3,5 años y 5,9 años de edad se encuentran en aumento tanto en el caso del DAP, como el volumen comercial.

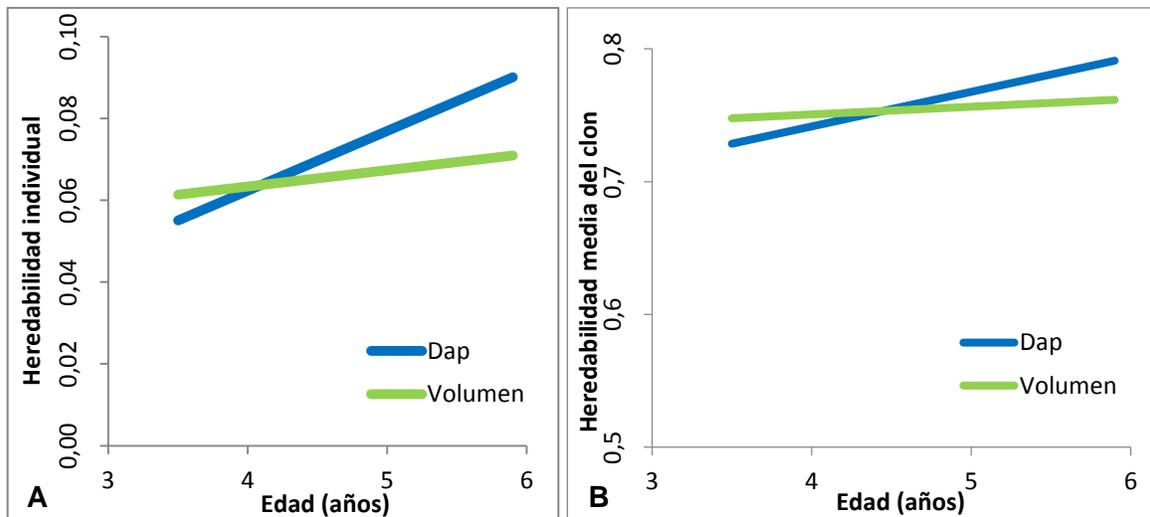


Figura 7. A. comportamiento de la heredabilidad del clon individual en sentido estrecho; B. comportamiento de la heredabilidad media; ambas, en función de la edad para la variable DAP y Volumen comercial en Agua Fría, Darién, Panamá.

Al generar la matriz de correlaciones genéticas para las variables evaluadas (Cuadro 14) se aprecia que las correlaciones más altas se registran entre los diámetros y los volúmenes comerciales evaluados a la misma edad, específicamente 97% entre el diámetro y el volumen a los 3,5 años y 96% entre el diámetro y el volumen a los 5,9 años de edad .

Por otro lado al comparar las correlaciones de variables semejantes en el tiempo, se aprecia que tanto para el DAP, como para el volumen comercial entre los 3,5 años y los 5,9 años a pesar de presentar correlaciones aceptables (64% y 52%, respectivamente) la información indica que aún se observan inconsistencias a nivel de ranking entre los 3,5 años en relación con los 5,9 años para estas dos variables (Cuadro 14).

Según el cuadro 14, la altura a 1,8 años de edad solo mantiene correlaciones significativas respecto al diámetro evaluado a los 3,5 años (52%) en relación a las restantes variables las correlaciones genéticas descienden por debajo del 48%.

La calidad a 3,5 años mantiene las mejores correlaciones correspondientes al DAP y el volumen comercial evaluado en la misma medición registrando valores de 57% y 58% respectivamente. Respecto a las otras variables los coeficientes de correlación genética no sobrepasan el 25% (Cuadro 14).

En cuanto al daño causado por viento, en el cuadro 14 se aprecia que este a los 5,9 años de edad, no mantuvo correlaciones genéticas significativas respecto a ninguna de las demás variables analizadas; el valor más elevado lo registro con el volumen comercial también a los 5,9 años con 41% en correlación genética.

Cuadro 14. Matriz de correlaciones genéticas de 33 genotipos para las variables evaluadas en tres mediciones distintas en Agua Fría, Darién, Panamá.

| Variable - Edad (años) | Altura 1,8 | DAP 3,5 | Calidad 3,5 | VolCom 3,5 | DAP 5,9 | Dviento 5,9 | VolCom 5,9 |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|
| Altura 1,8 | 1,00 | 0,52 | 0,11 | 0,48 | 0,43 | 0,12 | 0,38 |
| DAP 3,5 | | 1,00 | 0,57 | 0,97 | 0,64 | 0,01 | 0,60 |
| Calidad 3,5 | | | 1,00 | 0,58 | 0,21 | 0,09 | 0,25 |
| VolCom 3,5 | | | | 1,00 | 0,55 | -0,04 | 0,52 |
| DAP 5,9 | | | | | 1,00 | 0,24 | 0,96 |
| Dviento 5,9 | | | | | | 1,00 | 0,41 |
| VolCom 5,9 | | | | | | | 1,00 |

Se realizó el ranking para las 33 accesiones basado en los datos de volumen comercial a 5,9 años de edad en donde se obtuvo un promedio de 0,273 m³ de valor genético en volumen comercial por árbol para el ensayo, 0,285 m³ en promedio como valor genético para los primeros 10 genotipos del ranking y 0,291 m³ en promedio para el clon con mayor rendimiento volumétrico. Por lo cual, en promedio los primeros 10 registraron un incremento de 4,2% en volumen comercial por árbol respecto al promedio y el mejor genotipo presentó un incremento del 6,6% (Figura 8).

Al realizar esta misma comparación respecto a los dos materiales correspondientes a los testigos los cuales mostraron un valor genético promedio de 0,260 m³ en volumen comercial por individuo, se tiene que los primeros 10 genotipos mantienen 9,3% de mayor rendimiento y el clon número uno del ranking registra un 11,9% más en volumen comercial promedio por árbol que ambos testigos (Figura 8).

Cabe destacar que según los límites para los valores genéticos estimados por SELEGEN-REML/BLUP, solo existen diferencias significativas entre el clon 27 y el 10, los cuales ocupan respectivamente, la primera y última posición del ranking. Por lo cual, se debe aclarar que en este caso, no existen diferencias significativas entre los dos testigos evaluados respecto a los demás genotipos.

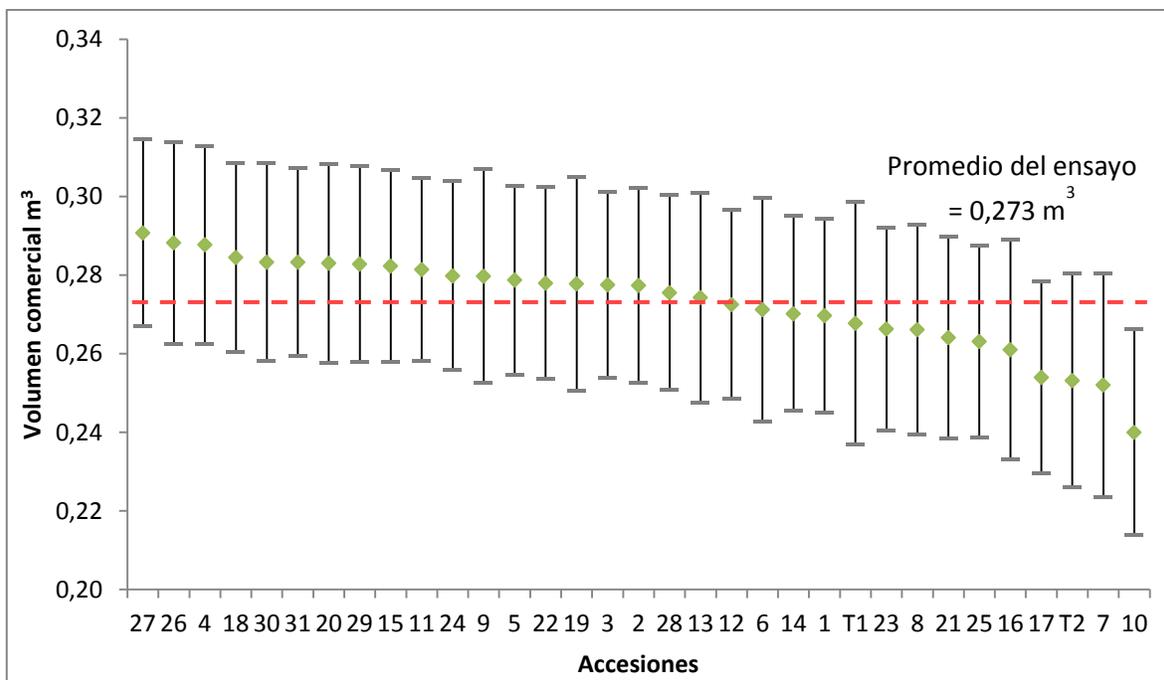


Figura 8. Valores genéticos para la variable volumen comercial (m³) estimado a los 5,9 años para 33 genotipos en Agua Fría, Darién, Panamá.

A partir de los valores genéticos determinados por SELEGEN-REML/BLUP para cada accesión, se determinó la ganancia genética esperada para los 10 mejores genotipos, tanto para la variable DAP como para el volumen comercial por individuo. Dicha ganancias genéticas mostraron un incremento diamétrico a los 5,9 años de 0,4 cm respecto al promedio del ensayo y de 0,9 cm en relación a ambos testigos (lo cual corresponde a ganancias de 2,0% y 4,6%, respectivamente); además, en cuanto al volumen comercial, a la misma edad los 10 mejores genotipos registraron 0,012 m³ más que el promedio de todos los materiales evaluados y 0,024 m³ más respecto a los testigos; dichos valores representan ganancias de 4,2% y 9,3% respectivamente (Cuadro 15).

Con base en las ganancias genéticas obtenidas para la variable DAP a los 5,9 años y tomando como base un turno de rotación de 18 años; se espera que los 10 mejores clones alcancen la cosecha final 0,4 años antes que empleando todos los genotipos evaluados y 0,8 años antes que ambos testigos (Cuadro 15).

Cuadro 15. Ganancia genética esperada por los 10 mejores genotipos a 5,9 años respecto al promedio del ensayo y el promedio de los testigos en Agua Fría, Darién, Panamá.

| Población de referencia | DAP (cm) | Tiempo (años) que se reduce la cosecha final | Volumen comercial (m ³) |
|-------------------------|---------------|--|-------------------------------------|
| Ensayo | 0,4 (2,0%) | 0,4 | 0,012 (4,2%) |
| Testigos | 0,9 (4,6%) | 0,8 | 0,024 (9,3%) |

Posteriormente se analizó el ensayo ubicado en Costa Rica; dicho ensayo contó con dos mediciones distintas, las cuales aportaron ocho variables a ser analizadas. Para efecto de este estudio, solo se consideraron aquellas variables cuyos parámetros genéticos fueron estimados con una precisión superior a 0,5, con esto se garantiza una evaluación eficiente de las variables seleccionadas.

De las ocho variables evaluadas inicialmente, solo daños por viento a los 3,0 años de edad no alcanzó una precisión de selección aceptable, por lo tanto, solo se tomaron en cuenta las siete variables restantes para ser analizadas (Cuadro 16).

Además, en el cuadro 16 se nota que a excepción de la calidad general a los 3,0 años (la cual registró una precisión de 68,9% en los estimados) el análisis de las variables realizado por el programa se realizó con precisiones superiores a 88%.

Cuadro 16. Precisión de la estimación de los parámetros genéticos de las variables evaluadas en 2 mediciones del ensayo clonal de *Tectona grandis* en Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

| Edad (años) | DAP | Daño viento | Calidad | Volumen comercial |
|-------------|-------|-------------|---------|-------------------|
| 3,0 | 0,921 | 0,224 | 0,689 | 0,927 |
| 5,4 | 0,925 | 0,885 | 0,893 | 0,921 |

La heredabilidad individual presentadas por las siete variables analizadas muestran valores superiores a 9%, a excepción de la calidad cuya heredabilidad fue baja en la primera evaluación registrando un valor de 3,3%.

Al comparar año con año cada variable, se observa que la heredabilidad individual mejora, aunque leve en el caso del DAP entre los 3,0 años y 5,4 años de edad. Para la variable calidad este incremento es mayor pasando de un 3,3% en heredabilidad individual a los 3,0 años a 11,1% a los 5,4 años. Sin embargo, este comportamiento no se mantiene en el caso del volumen comercial, el cual registra una heredabilidad individual de 15,0% a los 3,0 años que desciende a 13,7% a los 5,4 años de edad (Cuadro 17).

En cuanto a heredabilidad media del clon, la calidad a los 3,0 años fue la única variable que registró valores bajos (47,4%), las restantes seis variables mantuvieron comportamiento altos, superando el 78% de heredabilidad (Cuadro 17).

Al comparar cada variable año con año, se observa un aumento en los valores de heredabilidad media clonal para el DAP, mostrando una heredabilidad de 84,9% a los 3,0 años pasando a 85,6% a los 5,4 años. La calidad registra un incremento notorio de heredabilidad entre los 3,0 años y los 5,4 años de edad aumentando de 47,4% en la primera evaluación a 79,7% en la segunda. El volumen comercial muestra una tendencia estable de heredabilidad media por genotipo entre los dos años de medición, presentando una heredabilidad de 92,7% a los 3,0 años y de 92,1% a los 5,4 años de edad (Cuadro 17).

Los comportamientos de ambas heredabilidades en el tiempo, tanto para DAP como para volumen comercial se pueden apreciar mejor en la figura 9.

En cuanto a la variación genética en el cuadro 14 se observa que a excepción de ambas mediciones de volumen comercial, las restantes variables presentaron coeficientes inferiores a 10%; sin embargo, al comprar variables semejantes en el tiempo, se nota una mejoría de este parámetro con la edad.

Cuadro 17. Parámetros genéticos de un ensayo clonal con 35 genotipos en dos mediciones en Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

| Parámetros | DAP 3,0 | Calidad 3,0 | Volumen comercial 3,0 | DAP 5,4 | Daño viento 5,4 | Calidad 5,4 | Volumen comercial 5,4 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|
| Observaciones | 1108 | 1103 | 1103 | 1101 | 1101 | 1049 | 1099 |
| Vg | 0,670 | 7,122 | 0,0002 | 1,836 | 0,020 | 61,793 | 0,001 |
| Vparc | 0,028 | 15,769 | 0,00001 | 0,051 | 0,003 | 14,975 | 0,00003 |
| Ve | 4,130 | 189,820 | 0,001 | 10,773 | 0,179 | 478,300 | 0,006 |
| Vf | 4,828 | 212,711 | 0,001 | 12,660 | 0,201 | 555,069 | 0,007 |
| h²g | 0,139 ±0,032 | 0,033 ±0,016 | 0,150 ±0,033 | 0,145 ±0,033 | 0,097 ±0,027 | 0,111 ±0,029 | 0,137 ±0,032 |
| c²parc | 0,006 | 0,074 | 0,006 | 0,004 | 0,012 | 0,027 | 0,004 |
| h²mc | 0,849 | 0,474 | 0,860 | 0,856 | 0,783 | 0,797 | 0,848 |
| Precisión | 0,921 | 0,689 | 0,927 | 0,925 | 0,885 | 0,893 | 0,921 |
| CVgi% | 6,387 | 5,391 | 15,328 | 8,460 | 8,139 | 9,866 | 17,750 |
| CVe% | 6,604 | 13,909 | 15,154 | 8,483 | 10,491 | 12,213 | 18,378 |
| CVr | 0,967 | 0,388 | 1,011 | 0,997 | 0,776 | 0,808 | 0,966 |
| PEV | 0,101 | 3,746 | 0,00003 | 0,264 | 0,004 | 12,571 | 0,0001 |
| SEP | 0,318 | 1,935 | 0,006 | 0,513 | 0,065 | 3,546 | 0,012 |
| Media general | 12,815 | 49,503 | 0,096 | 16,018 | 1,716 | 79,677 | 0,172 |

En la figura 9 se puede apreciar claramente el comportamiento de las heredabilidades (individual y media del clon) en el tiempo tanto para el DAP, como para el volumen comercial. Según este comportamiento, en el caso de la heredabilidad individual, entre los 3,0 años y los 5,4 años de edad, se presenta un leve incremento en cuanto al DAP y una leve disminución en el caso del volumen comercial. Por otro lado, tanto para el DAP como para el volumen comercial, la heredabilidad media del clon se mantiene estable entre ambas mediciones rondando valores cercanos al 85%.

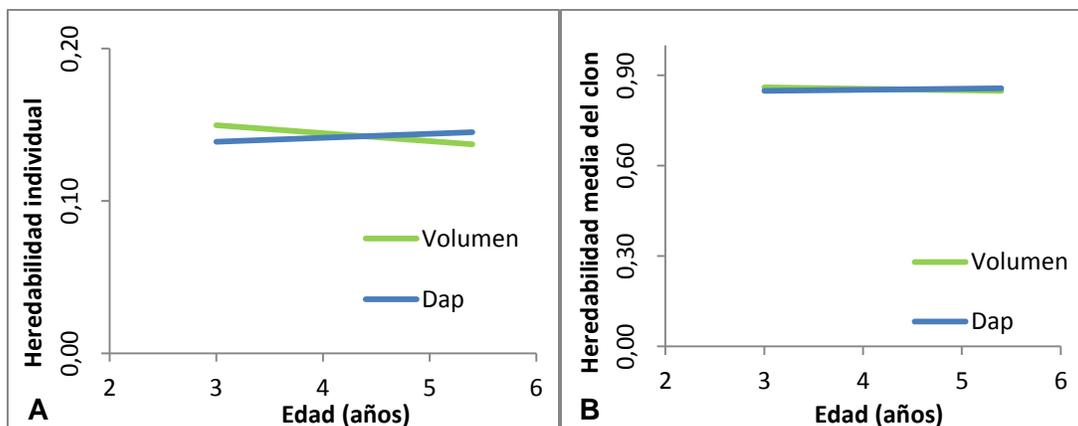


Figura 9. A. comportamiento de la heredabilidad del clon individual en sentido estrecho; B. comportamiento de la heredabilidad media; ambas, en función de la edad para la variable DAP y Volumen comercial en Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

Al generar la matriz de correlaciones genéticas se identifica que las variables para los dos años evaluados mantienen correlaciones altas entre sí, mostrando valores superiores a $\pm 44\%$ para cualquier caso observado (Cuadro 18).

Las correlaciones entre variables semejantes para los dos años de medición son considerablemente altas; 98% en el caso de los DAP, 77% para las calidades y 92% para los volúmenes (Cuadro 18).

Se obtuvo una alta correlación entre el diámetro y el volumen a la edad de 3,0 años y 5,4 años, con valores de correlación de 98% y 99%, respectivamente (Cuadro 18). Además, los diámetros también registraron correlaciones elevadas respecto al volumen comercial evaluados a edad distinta, rondando valores entre 91% y 92%.

En cuanto a las variables cualitativas se tiene que las calidades entre los dos años de medición registraron una correlación de 77%. Además, la calidad a los 3,0 años de edad mantuvo correlaciones positivas en un rango entre 57% y 58% respecto a las variables cuantitativas y presentó una correlación de -77% en relación al daño por viento a los 5,4 años. Por otro lado, la calidad a los 5,4 años de edad también mantuvo correlaciones positivas respecto a las variables cuantitativas, sin embargo, en un rango menor que en el caso de la calidad a los 3,0 años; en este caso rondó valores entre 44% y 53%; además, registró una alta correlación negativa respecto al daño por viento (-91%). A su vez, el daño causado por viento a los 5,4 años se correlacionó negativamente con las variables cuantitativas con valores entre -57% y -62% (Cuadro 18).

Cuadro 18. Matriz de correlaciones genéticas de 35 genotipos para las variables evaluadas en dos mediciones distintas en Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

| Variable - Edad (años) | DAP 3,0 | Calidad 3,0 | VolCom 3,0 | DAP 5,4 | Dviento 5,4 | Calidad 5,4 | VolCom 5,4 |
|-----------------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| DAP 3,0 | 1,00 | 0,62 | 0,98 | 0,93 | -0,61 | 0,46 | 0,91 |
| Calidad 3,0 | | 1,00 | 0,62 | 0,58 | -0,75 | 0,77 | 0,57 |
| VolCom 3,0 | | | 1,00 | 0,92 | -0,57 | 0,44 | 0,92 |
| DAP 5,4 | | | | 1,00 | -0,62 | 0,53 | 0,99 |
| Dviento 5,4 | | | | | 1,00 | -0,91 | -0,57 |
| Calidad 5,4 | | | | | | 1,00 | 0,51 |
| VolCom 5,4 | | | | | | | 1,00 |

Se realizó el ranking para las 35 accesiones basado en los datos de volumen comercial a 5,4 años de edad en donde se obtuvo un promedio en valor genético de 0,172 m³ en volumen comercial por árbol para el ensayo, 0,202 m³ en promedio como valor genético para los primeros 10 genotipos del ranking y 0,227 m³ en promedio para el clon con mayor rendimiento volumétrico. En promedio los primeros 10 registraron un incremento de 16,6% en volumen comercial por árbol respecto al promedio y con relación al mejor genotipo presentó un incremento del 32,0% (Figura 10).

Al realizar esta misma comparación respecto a los dos materiales correspondientes a los testigos los cuales ocuparon la última y penúltima posición en este caso, mostraron un valor genético promedio de 0,106 m³ en volumen comercial por individuo; se tiene que los primeros 10 genotipos mantienen 88,7% de mayor rendimiento y el clon número uno del ranking registra un 114,2% más en volumen comercial promedio por árbol que ambos testigos (Figura 10).

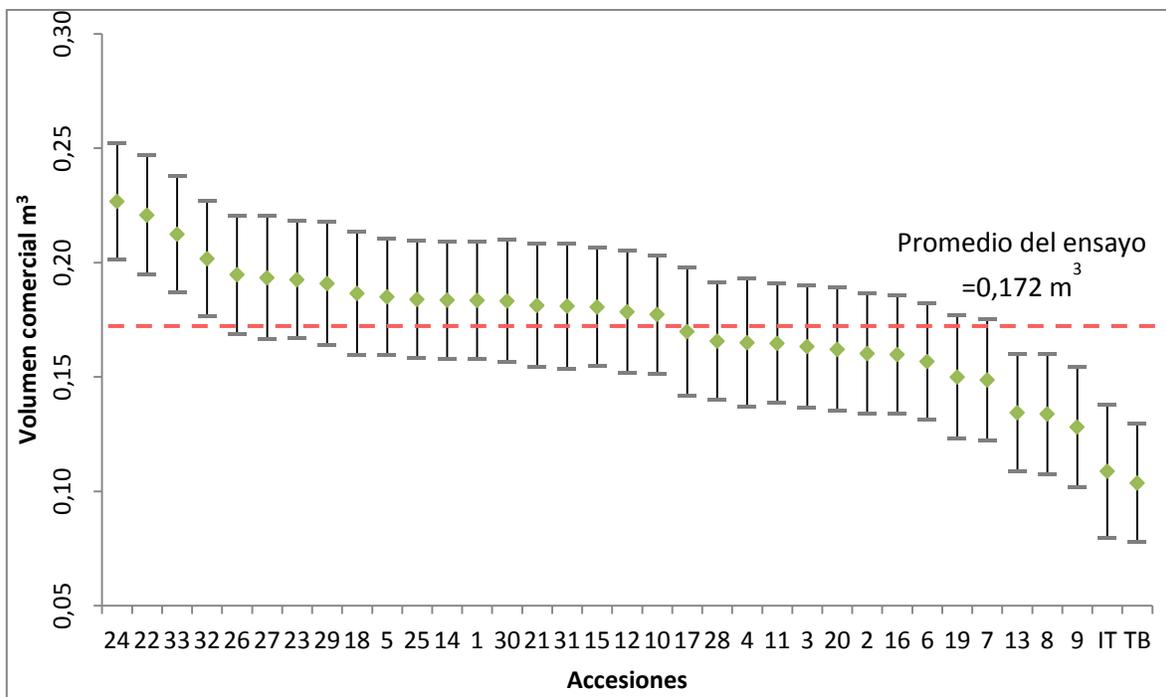


Figura 10. Valores genéticos para la variable volumen comercial (m^3) estimado a los 5,4 años para 35 genotipos en Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

Al igual que en el caso del ensayo de Panamá, para el ensayo costarricense partiendo de los valores genéticos, se determinó la ganancia genética esperada para los 10 mejores genotipos, tanto para la variable DAP como para el volumen comercial por individuo. En este caso, dichas ganancias genéticas fueron notoriamente mayores, ya que en este caso mostraron un incremento diamétrico a los 5,4 años de 1,2 cm respecto al promedio del ensayo y de 4,3 cm con relación a ambos testigos (esto corresponde a ganancias genéticas del 7,8% y 33,0%, respectivamente); además en cuanto al volumen comercial, a la misma edad los 10 mejores genotipos registraron un incremento volumétrico de 0,029 m^3 con relación al promedio de todos los materiales evaluados y 0,094 m^3 respecto a los testigos; dichos valores representan ganancias de 16,6% y 88,7%, respectivamente (Cuadro 19).

Además, considerando un turno de rotación de 18 años; con base en las ganancias genéticas obtenidas para la variable DAP a los 5,4 años, se espera que los 10 mejores clones alcancen la cosecha final 1,4 años antes que empleando todos los genotipos evaluados y 5,9 años antes que ambos testigos (Cuadro 19).

Cuadro 19. Ganancia genética esperada por los 10 mejores genotipos a 5,4 años respecto al promedio del ensayo y el promedio de los testigos en Osa, Pacífico sur, Costa Rica.

| Población de referencia | DAP (cm) | Tiempo (años) que se reduce la cosecha final | Volumen comercial (m³) |
|--------------------------------|-----------------|---|--|
| Ensayo | 1,2 (7,8%) | 1,4 | 0,029 (16,6%) |
| Testigos | 4,3 (33,0%) | 5,9 | 0,094 (88,7%) |

Debido a que el ensayo de Panamá y el de Costa Rica comparten 32 genotipos en común se generó un análisis en conjunto de ambos sitios para las variables DAP y volumen comercial evaluados en las mediciones de 5,9 años en el caso de Panamá y 5,4 años de edad para Costa Rica, esto con el fin de determinar la interacción genotipo-ambiente y analizar la posibilidad de reportar un ranking unificado para la empresa.

Tras generar los parámetros para los sitios en conjunto se obtuvo que las heredabilidades individuales en sentido estrecho para las tres variables evaluadas se mantuvieron bajas con valores de 4,0% en el caso del DAP y 5,6% para el volumen comercial (Cuadro 20).

La heredabilidad media por genotipo también registra valores bajos en el caso del DAP 49,1%, sin embargo, en el caso del volumen comercial, este parámetro un aumento considerable, registrando un valor de heredabilidad del 62,8% (Cuadro 20).

En cuanto a la correlación genética entre localidades (rgloc) el DAP presentó un valor levemente por debajo del mínimo aceptable (49,1%), y el volumen comercial registró un valor aceptable, mostrando un 52,6% en correlación genética entre ambas localidades (Cuadro 20).

Además, en el cuadro 20 se observa, al igual que en el análisis individual de cada sitio a su respectiva edad, coeficientes de variación genética bajos tanto para el DAP y volumen comercial (3,5% y 8,2%, respectivamente).

Cuadro 20. Parámetros genéticos de dos ensayos genéticos (uno en Panamá y otro en Costa Rica) con 32 genotipos en común.

| Parámetros | DAP | Volumen comercial |
|--------------------------|---------------|--------------------------|
| Observaciones | 1489 | 1487 |
| Vg | 0,400 | 0,0003 |
| Vparc | 0,047 | 0,00003 |
| Vint | 0,668 | 0,0003 |
| Ve | 8,840 | 0,005 |
| Vf | 9,954 | 0,006 |
| h²g | 0,040±0,015 | 0,056±0,017 |
| c²parc | 0,005 | 0,005 |
| c²int | 0,067 | 0,051 |
| h²mc | 0,491 | 0,628 |
| Precisión | 0,701 | 0,793 |
| rgloc | 0,374 | 0,526 |
| PEV | 0,204 | 0,0001 |
| SEP | 0,451 | 0,011 |
| CVgi% | 3,488 | 8,201 |
| CVe% | 5,086 | 10,128 |
| Media General | 18,129 | 0,224 |

Tal como lo indica la correlación genética entre ambas localidades para la variable volumen comercial por individuo (Cuadro 20), un valor de 52,6% presenta una correlación intermedia entre localidades, es decir, algunos genotipos pueden mostrarse estables entre localidades y otros no.

En este caso, en la figura 11 se identifican clones con alta estabilidad o interacciones simples entre localidades. En cuanto al primer tercio de la distribución para ambos ensayos se identifican seis clones estables y con altos rendimientos volumétricos, estos genotipos corresponden al clon 24, 22, 26, 27, 29 y 18.

Por otro lado, también se identificaron genotipos que con alta variación posicional respecto a los tercios de distribución valores genéticos estimados por SELEGEN-REML/BLUP; es decir, genotipos que presentaron interacciones complejas entre sitios. Dichos materiales corresponden al genotipo 4, 20, 11, 9, 19, 13, 23, 10 y 17 (Figura 11). Cabe mencionar que es el ensayo localizado en Panamá el que muestra los mayor cantidad de descendos fuertes en posición de ranking al compáralo con el ensayo ubicado en Costa Rica.

Además, se identificaron tres genotipos que claramente muestran bajos rendimientos en volumen comercial en ambos sitios; estos corresponden a los clones 8, 16 y en mayor medida el 7 (Figura 11).

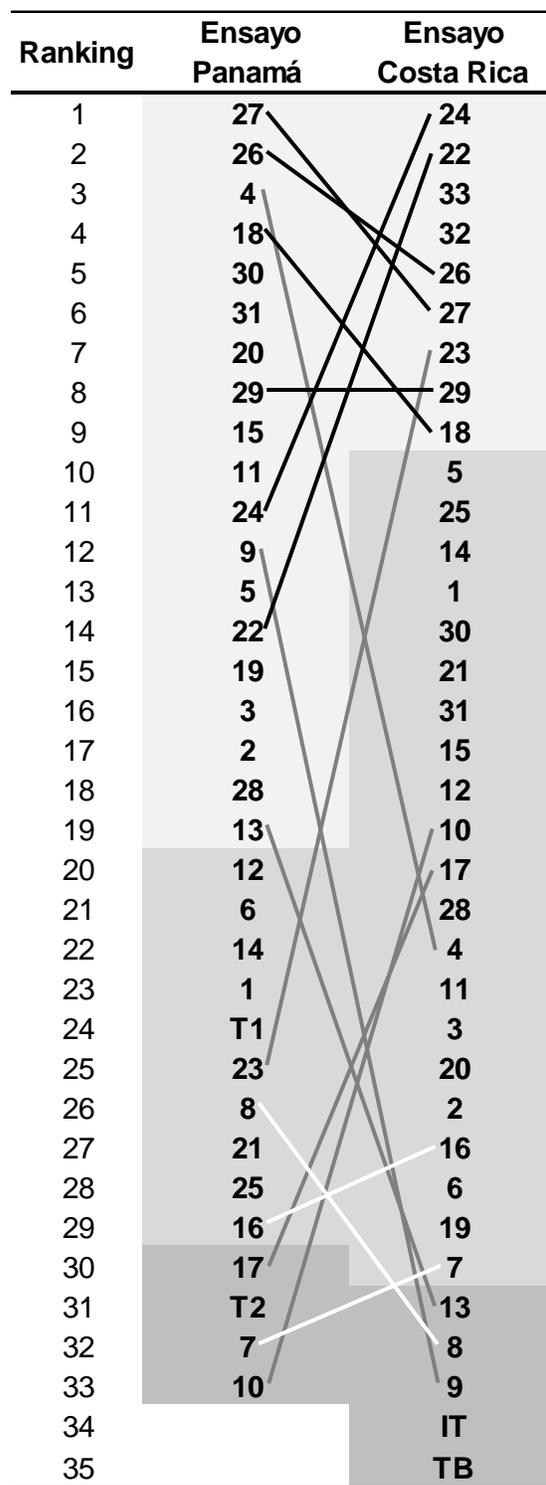


Figura 11. Ranking genético para la variable volumen comercial de los ensayo de Panamá y Costa Rica a las edades de 5,9 años y 5,4 años respectivamente.

DISCUSIÓN

Parámetros genéticos

A excepción del DAP a los 5,9 años, todas las variables analizadas en el ensayo de Panamá mostraron una heredabilidad bajo (Cuadro 13). Sin embargo a edades tempranas, Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval (2015) mencionan que este tipo de resultados indican que tanto la corta edad como las condiciones de sitio pueden estar afectando el desarrollo y expresión del potencial genético del material evaluado. Por lo tanto, es de esperar que para las dos primeras mediciones, los individuos no hubiesen expresado claramente su potencial genético.

A los 5,9 años el DAP adquiere un valor de heredabilidad individual aceptable (9,0%) lo cual indica una posible edad de selección con base en esta variable (Cuadro 13).

En el caso del ensayo de Costa Rica este parámetro tiene un comportamiento distinto en las variables analizadas. Tanto para la primera como para la segunda medición las heredabilidades individuales son aceptables (superiores a 9,7%) excepto la variable calidad a los 3,0 años; esto indica que a esta edad la población no ha expresado su potencial genético de manera tal que no es una edad adecuada para realizar selección según esta variable (Pastrana, Espítia y Murillo 2012).

En el ensayo de Panamá entre los 3,5 y los 5,9 años se mantiene una heredabilidad individual creciente tanto para el DAP como para el volumen comercial. A pesar de que no se puede determinar 5,9 años como una edad óptima de selección por limitación de datos de mediciones más próximas a esta edad que confirmen una estabilización de esta heredabilidad; si se puede excluir 3,5 años como una edad para realizar selección genotípica, en vista de que registra valores de heredabilidad individual por debajo de los 5,9 años tanto para el DAP como para el volumen comercial.

En el caso del ensayo localizado en Costa Rica, a partir de los 3, años de edad, al igual que Callister (2013) se observó alta estabilidad en las heredabilidades, tanto de la variable DAP como el volumen comercial, además, en el caso del volumen se puede apreciar una leve disminución del parámetro entre las dos edades. A diferencia del ensayo de Panamá, los resultados indican que tanto para la variable DAP como para el volumen comercial a partir de los 3,0 años de edad es posible realizar selección genotípica de manera confiable. Esto se ve fuertemente respaldado con la precisión de los estimados los cuales

superaron un 92% de precisión en los 4 casos e indican una selección eficiente (Pastrana et al., 2012).

Lo anterior se explica principalmente, en el tipo de manejo realizado en ambos ensayos. El ensayo de Panamá recibió un raleo a los 3 años de edad del 50% y un segundo posterior a los 5 años del 33% sobre la masa remanente. Por el contrario el ensayo de Costa Rica hasta la fecha no ha recibido ningún raleo; esto ha generado una competencia mayor entre los individuos al no existir este tipo de liberaciones, alcanzando en el caso de Costa Rica arboles de 5,4 años de edad a una densidad poco menor (por mortalidad) a 1111 árboles por hectárea, la cual corresponde a la densidad inicial. Esta fuerte competencia puede ser motivo de una expresión temprana del potencial genético, mostrando desde edades más jóvenes, características controladas por la genética que presentan los individuos.

La heredabilidad media del clon, en el caso del ensayo de Panamá mantiene un comportamiento distinto a la heredabilidad individual; los parámetros muestran buenos valores para las variables analizadas, a excepción del daño causado por viento a los 5,9 años. Sin embargo, esta es una edad a la que no se esperaría tener una respuesta clara del daño causado por viento, ya que este tipo de daño es más claro en los primeros 3 o 4 años de edad, a esta edad dicho daño puede confundirse con factores meramente de calidad de fuste o propias del manejo (Murillo, 2016 comunicación personal).

Tanto la altura a 1,8 años como la calidad a 3,5 años muestran heredabilidades medias por genotipo de 57,8% y 78,0%, respectivamente; sin embargo, a pesar de mostrar una heredabilidad aceptable en ambos casos, no se pueden determinar cómo edades adecuadas de selección ya que proporcionan un dato único en el tiempo, el cual no describe el comportamiento seguido con la edad para cada variable (Cuadro 13).

En cuanto al DAP y el volumen comercial, la heredabilidad media del clon presenta un comportamiento similar a la heredabilidad individual, en donde entre los 3,5 años y 5,9 años de edad, se observa un claro incremento para ambas variables (Figura 7), el cual es más notorio en el caso del DAP con un aumento de 6,2% de heredabilidad media entre los dos años. Además, al igual que respecto a la heredabilidad individual, no se puede determinar 5,9 años como una edad óptima de selección, por la limitación de datos de mediciones próximas a esta edad que confirmen una estabilización de la curva de esta heredabilidad; sin embargo, si se puede excluir 3,5 años como una edad para realizar

selección genotípica ya que esta registra valores de heredabilidad individual considerablemente por debajo de los 5,9 años, tanto para el DAP como para el volumen comercial.

En cuanto al ensayo de Costa Rica, la heredabilidad media por genotipo sigue el mismo comportamiento que la heredabilidad individual en donde todas las variables (a excepción de la calidad a los 3,0 años) muestran valores altos, (superiores a 84%) y estables desde los 3,0 años de edad (Cuadro 17). Esto refuerza la idea de que respecto a la variable DAP y volumen comercial, en este caso es posible realizar una adecuada selección genotípica desde los 3 años de edad, sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la ausencia de raleos pudo contribuir en una expresión temprana del potencial genético. Caso contrario sucede con la variable calidad, la cual aún mantiene un incremento en heredabilidad entre los 3,0 y 5,4 años de edad, por lo cual, a pesar que no se puede afirmar 5,4 años como edad adecuada para hacer selección en función del fuste comercial, si se puede descartar 3,0 años como edad de selección en función de esta variable. Lo anterior se fundamenta con el grado de determinación de los parámetros (Pastrana et al. 2012) los cuales a excepción de la calidad a los 3,0 años mostró valores superiores a 88% (Cuadro 17).

Los valores de la heredabilidad individual en sentido estricto, como los de la heredabilidad media clonal, indican edades de selección genotípicas distintas para ambos sitios; aparte de las diferencias ambientales entre sitios, el manejo recibido por ambos ensayos pudo influir en la expresión temprana del potencial genético en el caso del ensayo de Costa Rica, ya que este no recibió ninguna poda, lo cual indujo al ensayo en una fuerte competencia espacial.

Por otro lado, la baja variabilidad genética en ambos ensayos (a excepción de la variable volumen del ensayo de Costa Rica) es contradictorio a lo mencionado por Fonseca (2004) y Camino y Morales (2013) quienes aseguran que la gran diversidad de condiciones ambientales dentro de las zonas de distribución natural de esta especie lleva a suponer que sea una especie con alta variabilidad genética. Sin embargo, tal como en este estudio, se ha encontrado que en América Central y Caribe la variabilidad genética se ha mostrado baja (Camino y Morales 2013), esto puede deberse a que en esta región la teca (*Tectona grandis*) corresponde a una especie introducida por lo cual, es de esperar que inicialmente el material haya sido ingresado por medio de semillas provenientes de una o pocas regiones y de ahí se empezara a expandir el material por el país, por ende esto

explique la baja variabilidad genética mostrada en todos los años en ambos ensayos cuyos coeficientes no superan el 7,6% de variabilidad en Panamá y 9,9% en Costa Rica.

La variable volumen en el ensayo de Costa Rica, presentó coeficientes de variación genética de 15,3% y 17,7%, para las edades de 3,0 años y 5,4 años, respectivamente. Esto indica que a este nivel, las diferencias entre individuos son más evidentes y por la competencia entre árboles, es posible obtener diferencias genéticas más claras.

Correlaciones genéticas

El ensayo de Panamá, registra una correlación alta entre la variable DAP y volumen comercial, con un valor superior a 96%, comportamiento normal en vista de que para el cálculo del volumen comercial se requiere el valor del respectivo DAP (Cuadro 14).

En cuanto a la correlación entre cada variable y sus respectivas edades, en el caso del diámetro fue de 64%, muy similar a la correlación entre diámetros de 3 años y 6 años de edad (66%) registrado por Goh, Japarudin, Alwi, Lapammu, Flori & Monteuuis (2013) en un estudio similar a este; por otro lado, el volumen a ambas edades mostró una correlación genética de 52%, lo cual, a pesar de ser valores aceptables y de indicar que gran parte de los materiales del ranking mantienen su posición entre ambos años, estos coeficientes no son tan altos como en otros casos (Cuadro 18). Lo anterior refuerza lo analizado con las heredabilidades, mostrando en este caso que 3,0 años no es una edad adecuada para realizar una selección genética precisa, ya que se ha demostrado que las correlaciones genéticas de variables semejantes entre edades pueden alcanzar valores más altos los cuales reflejen una estabilidad del ranking en el tiempo según determinada variable (Pavlosky y Murillo, 2013).

La altura a 1,8 años registra correlaciones en general bajas, el mayor valor lo muestra al correlacionarse con el diámetro a los 3,5 años con un valor de 52%, respecto a las demás variables, dicho coeficiente no supera el 48% de correlación (Cuadro 14).

La calidad a 3,5 años muestra correlaciones significativas respecto al DAP y volumen comercial de su mismo año de medición. Esto indica que a mayor DAP y volumen, mejor es la calidad del fuste comercial; además, al igual que Callister & Collins (2008) se encontró que en general las variables cuantitativas mantienen correlaciones positivas con

la rectitud del tallo. Este tipo de correlaciones comercialmente son ideales ya que garantiza mayor calidad de fuste comercial en árboles de mayor tamaño.

El daño causado por el viento a 5,9 años no mantuvo correlaciones significativas con ninguna otra variable (inferior a 24%). Razón de esto tal como lo explica Murillo (2016) en comunicado personal, el efecto del daño por viento no es notorio a estas edades ya que esta afectación es más frecuente en plantaciones jóvenes y probablemente los individuos a los 5,9 años ya hayan superado en gran medida los daños causados principalmente por dobles de fuste los cuales pueden ser rectificadas o hayan sido eliminados por medio de los raleos.

Con respecto al ensayo de Costa Rica, los coeficientes de correlación mejoran, con valores que van desde 44% a 99% (Cuadro 18). Además, al igual que en el caso de Panamá, los diámetros mantienen una alta correlación con la variable volumen comercial (98% y 99%, respectivamente), lo anterior se atribuye a que el volumen fue estimado con base a los respectivos diámetros.

Las correlaciones genéticas para cada variable permiten suponer que a la edad de 3 años se puede realizar selección genética precisa. Valores de 93% para DAP a los dos años de evaluación así como de 92% en el caso del volumen comercial indican el potencial de crecimiento en ambas variables que exhiben los árboles se expresa desde temprana edad y se ha mantenido de manera robusta, es decir, existe estabilidad a nivel de ranking; esto permitiría realizar selección temprana en función del diámetro a la altura del pecho (Pavlosky y Murillo, 2013).

Por otro lado, en menor media la calidad, a ambos años presenta un comportamiento similar, registrando una correlación alta entre los 3,0 años y 5,4 años de edad (77%) sin embargo, sensible a leves cambios a nivel de ranking genético, por lo cual no es posible determinar los 3,0 años como una edad adecuada de selección en función de la calidad del fuste comercial.

Con relación de la calidad a ambas edades, tomando en cuenta las variables cuantitativas, en el cuadro 18 se aprecia que en este caso se observó, al igual que en el caso Callister & Collins (2008) correlaciones positivas entre ambos tipos de variables. Como se mencionó anteriormente, para efectos de producción de madera, correlaciones de este tipo entre calidad de fuste comercial y variables cuantitativas son las deseables,

ya que indica que árboles de alto rendimiento dasométrico, mantendrán también buena forma de fuste.

Otra variable que mantiene un comportamiento esperado es el daño por viento a los 5,4 años, la cual se correlacionó significativa y negativamente con el resto de variables, mostrando así como este tipo de daños puede perjudicar negativamente características deseables como lo es en este caso la calidad a la misma edad con correlaciones de -91% (Cuadro 18).

Ranking genético

En cuanto al ranking genético generado por SELEGEN-REML/BLUP se observó, en el caso del ensayo de Panamá, que a los 5,9 años, los 10 mejores genotipos mantienen en promedio un 4,4% de rendimiento volumétrico superior al promedio del ensayo y 9,6% respecto a los testigos. Al realizar esta misma comparación en relación al genotipo que ocupó la primera posición encontramos un 6,6% y 11,9% de rendimiento superior respecto al promedio del ensayo y los testigos, respectivamente (Figura 8). Sin embargo no existen diferencias significativas entre las accesiones evaluadas que garantice la superioridad del material; la única relación que muestra diferencias significativas es entre el clon 27 y el clon 10, los cuales ocuparon la primera y última posición del ranking, respectivamente.

Por lo tanto, en este caso, los datos sugieren que la base genética de la empresa es estrecha y es necesario obtener material de árboles plus de procedencias distintas a las actuales; esta afirmación es reforzada con los coeficientes de variación genética presentadas en el cuadro 13 en el cual, ninguna de las variables analizadas superó un 7,6% de variación genética. Como se puede observar en el mismo cuadro, entre los 3,5 años y los 5,9 años de edad la variable volumen comercial muestra un descenso en la variación genética producto del raleo realizado a los 5 años sin embargo, se ha demostrado que a pesar de que los raleos pueden generar una disminución de los parámetros, no suele afectar significativamente el ranking genético (Pavlosky y Murillo 2013).

Es posible atribuir la ausencia de diferencias significativas entre los materiales a las condiciones del sitio, ya que si este no reúne las condiciones adecuadas para el

crecimiento de esta especie, es poco probable que los genotipos evaluados expresen adecuadamente su potencial genético (Valerio, 1986. Ávila et al. 2015).

En el caso de Costa Rica a los 5,4 años de edad el comercial por individuo mostró diferencias significativas muy marcadas entre genotipos (Figura 10); un coeficiente de variación genética de 17,8% refuerza la existencia de diferencias entre accesiones en volumen comercial a los 5,4 años (Cuadro 17). Tanto Valerio (1986) como Ávila et al. (2015) mencionan que esto es un indicador de que el sitio reúne las condiciones necesarias para el crecimiento del material clonal ya que permite la expresión de su potencial genético.

Exceptuando los contrastes presentados por las accesiones en el ranking de volumen comercial a los 5,4 años, se puede tener la certeza que las estimaciones para esta variable, fueron precisas ya que con los valores altos de heredabilidad (individual de 13,7% y media del clon de 84,8%) se obtiene una mayor certeza y eficiencia de selección (Salas et al. 2016) estos valores son respaldados por la exactitud de los estimados (92,1%) (Cuadro 17).

Además el hecho de que ambos testigos se posicionen en la penúltima y última posición del ranking genético indica que la selección de árboles plus por parte de la empresa fue eficiente.

Cabe mencionar que los clones 33 y 32, correspondientes a los 2 genotipos que no compartían ambos ensayos, en el caso de Costa Rica se posicionaron en tercera y cuarta posición, por lo cual, es evidente lo interesante que hubiese sido establecer ambos clones en el ensayo localizado en Panamá.

Ganancia genética

Al igual que en los anteriores análisis realizados para ambas localidades, en el caso de la ganancia genética esperada mostró un comportamiento diferente entre sitios. En el caso de Panamá se determinaron ganancias bajas para el DAP y el volumen comercial al comparar los 10 mejores genotipos tanto respecto al promedio del ensayo como a los testigos. Cornelius (1994) hace hincapié en que la ganancia genética depende de la intensidad de la selección, la variación genética y la heredabilidad de los caracteres

evaluados; en este estudio se registraron tanto para la variable DAP como para el volumen comercial coeficientes de variación genética muy bajos (2,8% y 6,3%, respectivamente) siendo estos indicadores del potencial de mejoramiento genético (Salas, 2012); además, el volumen comercial mostró una heredabilidad individual de 7,1% la cual se puede identificar como baja también (Cuadro 13). Por lo cual, se asumen estas, como las razones de las bajas ganancias genéticas mostradas por los 10 mejores clones (4,6% en DAP y 9,3% en volumen comercial, ambos respecto a los testigos) (Cuadro 15). Las ganancias bajas indican la ausencia de diferencias significativas entre clones, y de estos respecto a los testigos siendo estas diferencias uno de los objetivos buscados al evaluar materiales genéticos; esto es apoyado por Balcorta y Vargas (2004) quienes aclaran que el éxito de los programas de mejoramiento genético se determina por la calidad de los árboles seleccionados y la ganancia genética.

Así mismo, se encontraron valores bajos al estimar la ganancia en tiempo para la cosecha final. Tomando como base 18 años para dicha cosecha los 10 mejores genotipos mostraron un acortamiento en el turno de rotación de 0,4 años respecto a todos los materiales evaluados y de 0,8 años respecto a los testigos (Cuadro 15). Por lo tanto, plantaciones establecidas con semillas que fuesen cosechadas a los 18 años, al implementar los 10 mejores clones de este estudio se esperaría que fueran cosechas a 17,2 años de edad. Sin embargo según Cornelius (1994), se podría esperar que tanto ganancias genéticas como fenotípicas incrementen con la edad, esto conforme el material exprese de manera más clara el potencial genético, siempre y cuando, las condiciones del sitio lo permitan.

En el caso del ensayo de Costa Rica, la ganancia genética mostrada por los 10 mejores genotipos, muestra diferencias muy marcadas, en especial respecto a los testigos ya que con esto queda demostrada por mucho la superioridad en rendimiento en crecimiento que se puede alcanzar con material clonal; lo anterior siempre y cuando tanto la selección de árboles plus como evaluación de los genotipos se efectúe de forma correcta, ya que tanto Cornelius (1994) como Franzel, et al., (1996) afirman que la selección de árboles con rendimiento comercialmente superior podría ser ineficaz si no se realiza de forma adecuada, generando que las ganancias genéticas estimadas lleguen a ser próximas a cero.

Al realizar la selección genética con base en los 10 mejores genotipos se encontraron ganancias genéticas de 33,0% en DAP y 87,7% para el volumen comercial por individuo,

ambos respecto a los testigos (Cuadro 19); sin embargo, es posible obtener mayores ganancias seleccionando un grupo menor de los mejores clones ya que dicha ganancia depende de la intensidad de la selección, la variación genética y la heredabilidad de las variables evaluadas (Cornelius, 1994); ante esto, Balcorta y Vargas (2004) mencionan que el genetista no puede manipular la heredabilidad, sin embargo si la intensidad de selección para incrementar ganancias. Sin embargo, en contraposición a la selección de pocos genotipos con el objetivo de aumentar la ganancia genética, Salas et al. (2016) en un estudio sobre tolerancia a enfermedades encontraron genotipos de melina (*Gmelina arborea*) tanto con alta como baja tolerancia a determinadas enfermedades, por lo cual es de esperar que este factor se encuentre bajo control genético; por lo tanto, establecer plantaciones comerciales con pocos genotipos, además de reducir la variación genética, sería de alto riesgo ante la incidencia de patógenos si dichos clones no han sido adecuadamente evaluados para comprobar la resistencia en este aspecto.

En cuanto a la ganancia mostrada en tiempo por los 10 mejores genotipos respecto a la cosecha final, se encontró que asumiendo un turno de rotación de 18 años, se espera una ganancia de 1,4 años respecto a la implementación de todas las accesiones evaluadas y 5,9 años respecto a los testigos (Cuadro 19); es decir, asumiendo plantaciones establecidas con semillas que fuesen cosechadas a los 18 años, al implementar los 10 mejores clones encontrados en este estudio se esperaría realizar la cosecha final a los 12,1 años de edad. A favor de esta ganancia en tiempo Cornelius (1994) menciona que se podría esperar que las ganancias aumenten con la edad, en la medida en que el material evaluado exprese con mayor claridad el potencial genético, esto ya que hay que recordar que la estimación se realizó con información obtenida a los 5,4 años. Importante considerar que este ensayo a los 5,4 años aún no había recibido ningún tipo de raleos, lo cual indujo al ensayo a fuertes condiciones de competencia; esto podría generar diferencias más marcadas entre los mejores y los peores materiales y por ende provocar mayores ganancias genéticas al comparar ambos materiales. Por lo tanto, sería ideal que el ensayo reciba el mismo tipo de manejo brindado a las plantaciones comerciales, garantizando así, datos más ajustados a la realidad.

Interacción Genotipo - Ambiente

Como se observa en el cuadro 20 al analizar dos ambientes distintos, lo cual es lo mínimo recomendado para determinar el posible efecto de la interacción genotipo-ambiente (Ávila et al., 2015) se observó que a pesar de que el ensayo de Costa Rica mostraba parámetros altos, al analizarlo en conjunto con el ensayo de Panamá los valores se vieron considerablemente disminuidos, lo anterior debido a los bajos parámetros mostrados por este ensayo, el cual no mostró diferencias significativas entre genotipos a excepción del clon 27 respecto al 10 (Figura 8). Ávila et al., (2015) en un trabajo sobre melina (*Gmelina arborea*) en dos sitios, encontraron al igual que en este estudio que los materiales expresaban diferencias significativas en una localidad, sin embargo en la otra no; lo cual reafirmó la necesidad de determinar un ranking genético para cada sitio.

En el caso del DAP el cual mostró heredabilidades y un coeficiente de variación genética bajos. Además, la correlación genética entre localidades indica que esta variable muestra rankings muy distinto entre sitios, por lo cual es de esperar que las interacciones sean de tipo complejas (Pastrana et al., 2012).

En cuanto al volumen comercial los parámetros mejoran, especialmente en heredabilidad media del clon y la correlación genética entre localidades la cual fue de 0,53; ante un valor similar a este, Pastrana et al. (2012). Este resultado implica que el ranking genético entre ambos sitios empieza a mostrar resultados similares.

Sin embargo, este valor de correlación no es lo suficientemente robusto como para garantizar un ranking unificado para ambas localidades, a no ser que se logre identificar genotipos superiores que se repitan claramente en ambos sitios.

Al comparar los rankings genéticos del ensayo de Panamá y el de Costa Rica, se puede identificar la presencia de seis clones que para ambos sitios se mantienen en el primer tercio de los rankings, es decir, muestran un alto rendimiento en ambas localidades por lo cual, corresponde a los genotipos que ocuparían las primeras posiciones en un ranking unificado de la empresa, estos clones corresponden al 24, 22, 26, 27, 23 y 18. Además, cabe destacar la importancia de evaluar los clones 32 y 33 en otros sitios ya que solo fueron evaluados en el ensayo costarricense en donde ocuparon excelentes posiciones en el ranking (Figura 11). Tanto Byron (2004) como Osorio (2004) mencionan que el éxito

o el fracaso de un programa de mejoramiento genético se basan en determinar correctamente cuales materiales genéticos son superiores para cada sitio.

A pesar de identificar seis genotipos con buen rendimiento en ambos sitios, se considera al menos por ahora, adecuado mantener ranking genético específico para Panamá y otro para Costa Rica ya que en el caso de Panamá la carencia de diferencias significativas sugieren que las condiciones de sitio están afectando el desarrollo y expresión del potencial genético del material genético evaluado (Ávila et al., 2015). Murillo (1996) también refuerza esto al mencionar, que la expresión de las variables puede estar condicionada por la interacción con el sitio. Por lo cual es posible que el ensayo de Panamá genere un sesgo importante en un ranking unificado.

Como se puede observar los genotipos que mostraron alto rendimiento en ambos sitios son superiores al número 18, lo cual indica que con el tiempo el personal encargado en BARCA ha ido adquiriendo experiencia y destreza para seleccionar mejores árboles plus. Por lo que clones como el 32 y 33 pueden mostrar altos rendimientos al evaluarlos en otros sitios.

Además, al comparar ambos rankings en la figura 11 se aprecian clones que mantuvieron posiciones muy diferentes entre sitios, especialmente los genotipos 9 y 13 por mencionar los más relevantes, pasaron de ubicarse en el primer tercio en el ensayo panameño, al tercer tercio en el costarricense. Comportamiento de este tipo implican que las correlaciones genéticas entre localidades no alcance valores lo suficientemente altos (Cuadro 20).

Existen clones que en ambos sitios mostraron rendimientos deficientes especialmente el 7 el cual muestra en el ensayo de Panamá, un rendimiento inferior a ambos testigos, seguido de los clones 8 y 16. Por lo cual, es recomendable excluirlos del programa de mejoramiento, a no ser que mantengan comportamientos deseados en otras variables, dando la posibilidad de combinar características por medio de cruces controlados con el fin de trabajar múltiples características comercialmente deseables (Indira, 2006).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos las condiciones de sitio en el ensayo de Panamá influyeron en el bajo potencial genético expresado por las accesiones en el tiempo, que se reflejó con la ausencia de diferencias significativas entre las variables evaluadas.

En el ensayo de Panamá, las variables cualitativas no registraron correlaciones significativamente altas respecto a las cuantitativas, sin embargo en el caso de la calidad a 3,5 años mostro correlaciones positivas.

A excepción del clon 27 respecto al 10, en el ensayo de Panamá no existen evidencias significativas que permita garantizar la existencia de genotipos con rendimientos volumétricos superiores.

La carencia de diferencias significativas entre las accesiones evaluadas en Panamá, generó ganancias bajas, tanto en DAP como en volumen comercial por individuo y en tiempo para la cosecha final.

La fuerte competencia a la cual ha sido expuesto el ensayo de Costa Rica producto de la ausencia de raleos puede ser un claro motivo de una expresión temprana (3,0 años) del potencial genético de los clones.

El ensayo de Costa Rica registro correlaciones superiores a 91% entre todas las variables cuantitativas entre los 3,0 años y 5,4 años de edad.

La calidad a ambas edades evaluadas muestra correlaciones en general, significativamente positivas respecto a las variables cuantitativas. En cambio en daño por viento presentó correlaciones significativamente negativas respecto a las demás variables analizadas.

El ensayo de Costa Rica si mostró diferencias claramente significativas entre los genotipos con mayor y menor rendimiento volumétrico a los 5,4 años.

El hecho de que ambos testigos ocuparan la penúltima y última posición del ranking genético en Costa Rica, indica una eficiente selección de árboles plus por partes de la empresa.

En el ensayo de Costa Rica a los 5,4 años se registraron ganancias genéticas de 33% en DAP y 89% en volumen comercial al establecer los 10 mejores genotipos, respecto a los testigos.

Partiendo de información de la ganancia genética obtenida a los 5,4 años en Costa Rica para el volumen, se proyecta que para un turno de rotación de 18 años con material proveniente de semilla, al establecer los 10 mejores genotipos identificados se obtenga una ganancia de 5,9 años en alcanzar el diámetro de cosecha.

La baja variación genética mostrada por las variables evaluadas en ambos ensayos (a excepción de los volúmenes comerciales en el ensayo de Costa Rica) sugiere que es necesario ampliar la base genética identificando árboles plus con orígenes distintos a los habituales.

La correlación genética entre localidades para las variables DAP y volumen comercial indica que existe una interacción fuerte por parte del ambiente ante el desarrollo de ciertos genotipos. Estos genotipos corresponden principalmente a los clones 4, 20, 11, 9, 19, 13, 23, 10 y 17.

Sin embargo esta misma correlación entre localidades indica que también hay algunos clones (en este caso con rendimiento superior) que se mostraron muy estables entre ambos ambientes. Dichos clones corresponde al 24, 22, 26, 27, 29 y 18.

Ya que los genotipos 32 y 33 solo fueron evaluados en Costa Rica y mostraron ubicarse en muy buenas posiciones, es importante prestar atención estos dos clones y evaluarlos en otros tipos de ambientes.

Los genotipos que mostraron bajos rendimiento volumétricos en ambos ambientes corresponde al 8, 19 y en mayor medida el 7.

REFERENCIAS

- Abdelnour, A. y Muñoz, A. (2005). Micropropagación de teca (*Tectona grandis* L.f). *Revista Forestal Kurú*, 2(5). Recuperado de http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/antiores/antior5/pdf/Articulo%201.pdf
- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O. y Sandoval, C. (2015). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28). pp. 23-35.
- Avila, C., Salas, A. y Murillo, R. (2016). Selección de genotipos superiores de *Gmelina arborea* roxb. por su heredabilidad genética a la tolerancia de la enfermedad de pudrición del tronco, Pacífico sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, Volumen especial doi:10.18845/rfmk.v0i0.2548
- Balcorta, H. y 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), pp. 13-19.
- Byron, J. (2004). Growth potential of *Gmelina arborea* at 3 years of age in Colombia. *New Forest*, (28), pp. 269-276.
- Callister, A. & Collins, S. (2008). Genetic parameter estimates in a clonally replicated progeny test of teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *Tree Genetics & Genomes*, 4(2).
- Callister, A. (2013). Genetic parameters and correlations between stem size, forking, and flowering in teak (*Tectona grandis*). *NRC Research Press*, (43), pp. 1145-1150.
- Camino, R. y Morales, J. P. (2013). Las plantaciones de teca en américa latina: Mitos y realidades. Turrialba, Costa Rica.
- Cornelius, J. (1994). The effectiveness of plus-tree selection for yield. *Forest Ecology and Management*, (67), pp. 23-34.

- Duarte, M. (2012). Avaliação silvicultural de progênies de *Tectona grandis* L.f. em estágio inicial.
- Eleotério, I., Vilela, M. D., da Silva, R. L. y Ribeiro, M. F. (2011). Genética forestal. Viçosa, Brasil: Editora Arka.
- Espitia, M., Murillo, O., Castillo, C., Araméndiz, H., y Paternina, N. (2010). Ganancia genética esperada en la selección de acacia (*Acacia mangium* WILLD) en Córdoba (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 13(2). pp. 99-107.
- Espitia, M., Murillo, O., y Castillo, C. (2011). Ganancia genética esperada en Teca (*Tectona grandis* L.f.) en Cordoba (Colombia). *Colombia Forestal*, 14(1), pp. 81-93.
- Fallas, J. y Valverde, C. (2009). Costa rica: Mapas de precipitación media anual-estacional, meses secos y temperatura media anual. Heredia, Costa Rica.
- Fonseca, W. (2004). Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica.
- Franzel, S., Jaenicke, H. & Janssen, W. (1996). Choosing the right trees: setting priorities for multipurpose tree improvement. *ISNAR. Research report*, (8).
- Goh, D., Japarudin, Y., Alwi, A., Lapammu, M., Flori, A., & Monteuis, O. (2013). Growth differences and genetic parameter estimates of 15 teak (*Tectona grandis* L.f.) genotypes of various ages clonally propagated by microcuttings and planted under humid tropical conditions. *Silvae Genetica* (62), pp. 196-206.
- Hansen, O., Changtragoon, S., Ponoy, B., Kjær, E., Minn, Y., Finkeldey, R., Nielsen, K., & Graudal, L. (2015). Genetic resources of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) strong genetic structure among natural populations. *Tree Genetics & Genomes*, pp. 1-16.
- Indira, E. (2006). Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*, 18(1), pp. 36-50.
- Murillo, R. (1996). Evaluación de algunos factores ambientales que afectan la calidad de sitio a nivel de micrositio para melina (*Gmelina arborea* Robx) plantada en suelos planos en la zona Sur de Costa Rica. UNA, Heredia, Costa Rica.

- Murillo, O. y Badilla, Y., (2004a). Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal. Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O. & Badilla, Y., (2004b). Breeding teak in Costa Rica. IUFRO Meeting Forest Genetics and Genomics. Recuperado de www.ncsu.edu/feop/iufro_genetics2004/proceedings.pdf
- Murillo, O. (2007). Creación y Desarrollo de un modelo de vinculación ITCR-Sector Productivo-Estado para la Conservación y Mejoramiento Genético Forestal: (GENFORES). Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2011). Software para la evaluación de la calidad y valoración de plantaciones forestales. (programa de cómputo). Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O., Badilla, Y., Villalobos, M. y Rojas, F. (2013). Optimización de la tecnología de propagación vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón. Cartago, Costa Rica.
- Oficina Nacional Forestal de Costa Rica. (2015) Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2014. San José.
- Osorio, L. (2004). Provenance results of *Gmelina arborea* in southwest Colombia at three years of age. *New Forest*, (28), pp. 179-185.
- Pastrana, I., Espítia, M., y Murillo, O., (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *ACTA AGRONÓMICA*. 61(2), pp. 143-150.
- Pavlotzky, B. y Murillo, O. (2012). GANANCIA GENÉTICA ESPERADA EN *Acacia mangium* EN LOS CHILES, ZONA NORTE DE COSTA RICA. *Agronomía Mesoamericana* 23(1). pp. 1-14.
- Pavlotzky, B. y Murillo, O. (2013). Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en San Carlos, Zona Norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 10(24).

- Pavlotzky, B. y Murillo, O. (2014). GANANCIA GENÉTICA ESPERADA E INTERACCIÓN GENOTIPO-AMBIENTE EN *Acacia mangium* EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA. *Agronomía Costarricense* 38(2). pp. 7-17.
- Salas, R. (2012). Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Tesis de licenciatura inédita). Cartago, Costa Rica.
- Salas, A., Murillo, O., Murillo, R., Ávila, C. (2016). Evidencia de tolerancia genética a la pudrición del tronco en clones de *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, Volumen especial doi:10.18845/rfmk.v0i0.2550. pp. 30-39.
- Resende, M. (2007). SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computadorizada. (programa de computo). Brasília, Brasil, EMBRAPA.
- Resende, M. (2006). O software selegen-Reml/Blup. Brasil: Campo grande.
- Valerio, J. (1986). Evaluación de nueve procedencias de *Gmelina arborea* (Roxb.) en Turrialba, Costa Rica. Turrialba: CATIE.