

**Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Vicerrectoría de Investigación y Extensión  
Escuela de Ingeniería Forestal  
Centro de Investigaciones en Integración Bosque Industria**

Informe Final de Proyecto de Investigación

**Optimización de la tecnología de propagación vegetativa *in vivo* y  
plantación de teca y pilón.**

Ing. Olman Murillo Gamboa, Ph.D.  
Lic. Yorleny Badilla Valverde  
Ing. Marvin Villalobos, M.Sc.  
Ing. Fabiana Rojas Parajeles

Junio, 2013

## ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	4
<b>Abstract</b> .....	5
<b>Introducción</b> .....	6
<b>Objetivos del proyecto</b> .....	12
<b>Metodología</b> .....	13
<b>Objetivo específico 1:</b> Mejorar los sistemas de producción clonal de teca y pilón en ambiente protegido.....	13
<b>Objetivo específico 2:</b> Mejorar las técnicas de silvicultura clonal intensiva de plantaciones jóvenes de teca y pilón con base en su potencial de crecimiento.....	15
<b>Objetivo específico 3:</b> Determinar caracteres morfológicos de crecimiento temprano y su relación con sus patrones moleculares, como posibilidad de selección de genotipos superiores de las dos especies.....	18
<b>Objetivo específico 4:</b> Capacitar al personal de las empresas reforestadoras en el mejoramiento de los sistemas de producción clonal para mejorar su competitividad y capacidad exportadora.....	20
<b>Resultados</b> .....	22
Objetivo específico 1.....	22
Objetivo específico 2.....	32
Objetivo específico 3.....	36
Objetivo específico 4.....	41
<b>Limitaciones y problemas encontrados</b> .....	45
<b>Observaciones generales y recomendaciones</b> .....	46
<b>Indicadores de impacto y proyección del proyecto</b> .....	47
<b>Literatura citada</b> .....	48
<b>Anexos</b> .....	52
<b>Anexo 1 (artículo científico publicado en revista indexada)</b> .....	53
<b>Anexo 2 (Capítulos de libro de Fuentes Semilleras)</b> .....	66
<b>Anexo 3 (Capítulo de libro de teca)</b> .....	160

**Optimización de la tecnología de propagación vegetativa *in vivo* y  
plantación de teca y pilón.**

**Coordinador:** Ing. Olman Murillo Gamboa, Ph.D.  
Lic. Yorleny Badilla Valverde  
Ing. Fabiana Rojas Parajeles  
Ingeniería Forestal  
Ing. Marvin Villalobos, M.Sc.  
Ingeniería Agrícola

## Resumen

El proyecto logró mejorar las técnicas de propagación vegetativa *in vivo* bajo ambiente protegido de las especies teca, pilón y melina, esta última incluida durante el desarrollo del proyecto en casi todos los objetivos. Se determinó la mejor sombra para producción clonal (60-70%), el mejor espaciamiento en los minijardines clonales (10 x 5cm), y que el fotoperiodo de 15 horas aumentó levemente pero no significativamente la productividad de los minijardines clonales. Dentro del proyecto se logró desarrollar una aplicación programada en EXCEL que permite estimar los costos de producción de clones. Así también se optimizó una aplicación programada en EXCEL para la estimación de la capacidad de producción de sistemas clonales y estimación del tamaño del invernadero. Las investigaciones permitieron optimizar un sistema de control de calidad, tanto para el minijardín clonal, como para las plantas clonadas que van a reforestación comercial. Con base en la colección clonal de teca (50 genotipos) de la empresa Panamerican Woods (miembro de GENFORES), se desarrolló todo un protocolo de análisis y relación de bases de datos generados con los marcadores moleculares y las bases de datos obtenidas a partir de mediciones de campo. Entre otros parámetros poblacionales, se determinó que de 49 clones, su origen corresponde a 16 familias de hermanos completos, con lo que se reduce dramáticamente la base genética de PAW. El estado del conocimiento nuevo generado fue suficiente y transferido de manera intensiva a las 12 empresas reforestadoras vinculadas con el programa internacional de mejoramiento genético (GENFORES), así como a parte del sector forestal costarricense y al programa internacional de mejoramiento genético. El sistema de producción clonal evoluciona ahora hacia el desarrollo de miniplantas, que permiten reducir considerablemente los costos. Este salto tecnológico requiere abordar el modelo bajo la perspectiva de la fisiología. Las condiciones bajo ambiente protegido exigen un mayor control de temperatura, humedad relativa y luminosidad principalmente, junto con adecuada nutrición. Desde una perspectiva de la posibilidad de selección temprana de árboles superiores, se abre ahora una ruta al poder relacionar patrones fisiológicos durante el estadio de plántula con su desempeño como árbol maduro en plantación (correlaciones juvenil-adulto). Se exploró la estimación a temprana edad de tasa de fotosíntesis, de respiración, densidad estomática, que podrían estar relacionadas con su tasa de crecimiento a edades posteriores. Durante el proyecto se publicó a la fecha un libro, un capítulo de libro internacional de teca, 1 artículo científico (otro en prensa), se presentaron 12 ponencias en congresos nacionales e internacionales, 4 días de campo, 4 cursos internacionales, que impactaron directamente al sector forestal nacional e internacional. A manera de productos obtenidos, el proyecto logró consolidar el invernadero en la sede del ITCR en Santa Clara, San Carlos, como un laboratorio permanente de investigación + innovación + desarrollo en producción clonal forestal. Finalmente, se logró concluir con los estudios para la creación de una nueva empresa (donde el ITCR a través de FUNDATEC será socio), con su invernadero de producción clonal para poder satisfacer un 40% de la demanda nacional y exportar hacia Panamá y Nicaragua en una primera etapa.

**Palabras clave:** clonación, forestal, teca, pilón, melina, silvicultura clonal, mejoramiento genético, marcadores moleculares.

**Abstract**

This project improved *in vivo* vegetative propagation techniques of teak, pilon and melina tree species, under protected environmental conditions. Melina was included in almost all research activities of the project. The best shading density condition was established (60-70%), as well as the best miniclonal garden spacing (10x5cm). If photoperiod can be increased to 15 hours, an important but not significant productivity can be reached. Within the project, it was developed an EXCEL programmed application that allows costs of clonal propagation to be estimated. Besides, another EXCEL programmed application was also developed that allows clonal production capacity estimation, as well as greenhouse area needed to be estimated. As part of the research activities, a quality control system was optimized for mini-clonal gardens, as well as for final cloned-seedlings to be planted out. Based on the teak clonal collection (50 genotypes) in Panamerican Woods company (GENFORES member), a throughout data analysis protocol was developed, that allows a combined analysis of gene marker's output data vs field measurements data. Among several populational parameters, it was determined that from 49 original clones, all of them belong to only 16 different full sib families, which reduces dramatically PAW genetic basis. State of the art on new clonal forestry information was actively transferred to our 12 forestry associated companies (GENFORES), as part of Costa Rican forestry sector as well as to our international tree improvement program. Clonal production system evolves now toward miniplant systems allowing an important costs reduction. This technological step requires a physiological approach. Besides, nutrition among other environmental conditions in protected environments requires a major control mainly on temperature, relative humidity and luminosity. From the perspective of early selecting plus trees possibilities, it is now open a possibility of relating seedling physiological patterns with their mature stage performance (juvenile-adult correlations). Early estimations of photosynthesis rate, respiration, stomatic density, among others, were also explored and could be related with their growth and yield as aged. During the development of the project, it was published one book, one chapter in an international teak book, one scientific article (another in press), 12 papers in national and international congresses, 4 field-days, 4 international training courses, all together that produced an important direct impact on forestry national and international sector. In terms of research products, the project permitted the consolidation of our greenhouse at Santa Clara, San Carlos as a new and permanent research + innovation + development clonal forestry laboratory. Finally, the studies for a new clonal production company were finished (ITCR will be part of it through FUNDATEC), that must be able to produce about 40% of national demand, as well as the export to Panama and Nicaragua initially.

**Key words:** clonal forestry, teak, pilon, melina, vegetative propagation, tree improvement.

## Introducción

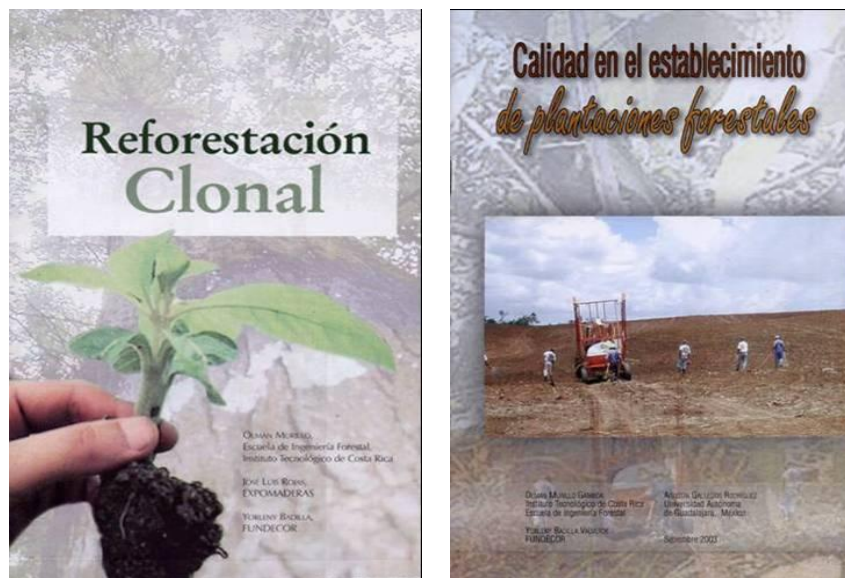
El proyecto logró mejorar las técnicas de propagación vegetativa *in vivo* bajo ambiente protegido de los árboles teca (*Tectona grandis*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*) y adicionalmente de melina (*Gmelina arborea*), que era su objetivo principal. Antes del proyecto el nivel de conocimiento sobre clonación de estas especies era únicamente operativo, sin ninguna explicación sobre las condiciones ambientales involucradas, ni tampoco explicaciones causa-efecto. Dos años después se generó un importante cúmulo de conocimiento nuevo que permitió validar, consolidar y optimizar buena parte de los protocolos de producción clonal forestal en el país. Su divulgación durante el desarrollo del proyecto fue periódica y permitió mantener una importante comunicación con el sector de impacto inmediato del proyecto, que son las 12 empresas reforestadoras vinculadas con nuestro programa internacional de mejoramiento genético. El sistema de producción clonal continúa evolucionando hacia el desarrollo de miniplantas, que permitan reducir considerablemente los costos de producción y reforestación en general. Este cambio impone un replanteamiento importante en la siembra tradicional de árboles de mayor tamaño. La resistencia natural al cambio por miniplantas requiere conocimiento del comportamiento fisiológico a distintos estadios y claramente, un mayor esfuerzo divulgativo y formativo. Las condiciones bajo ambiente protegido exigen un mayor control de temperatura, humedad relativa y luminosidad principalmente, junto con una adecuada nutrición y riego.

Desde una perspectiva de la posibilidad de selección temprana de árboles superiores, se abre ahora una ruta al poder relacionar patrones fisiológicos durante el estadio de plántula, con su desempeño como árbol maduro en plantación (correlaciones juvenil-adulto). La estimación a temprana edad de la tasa de fotosíntesis, de respiración, densidad estomática, podrían estar relacionadas con su tasa de crecimiento a edades posteriores (Flores, 2012). Estos caracteres son fundamentales en el metabolismo de las plantas, por tanto, podrían tener también una relación con las bandas alélicas que se obtienen con los marcadores genéticos, tarea iniciada en este proyecto y que continuará en futuras investigaciones.

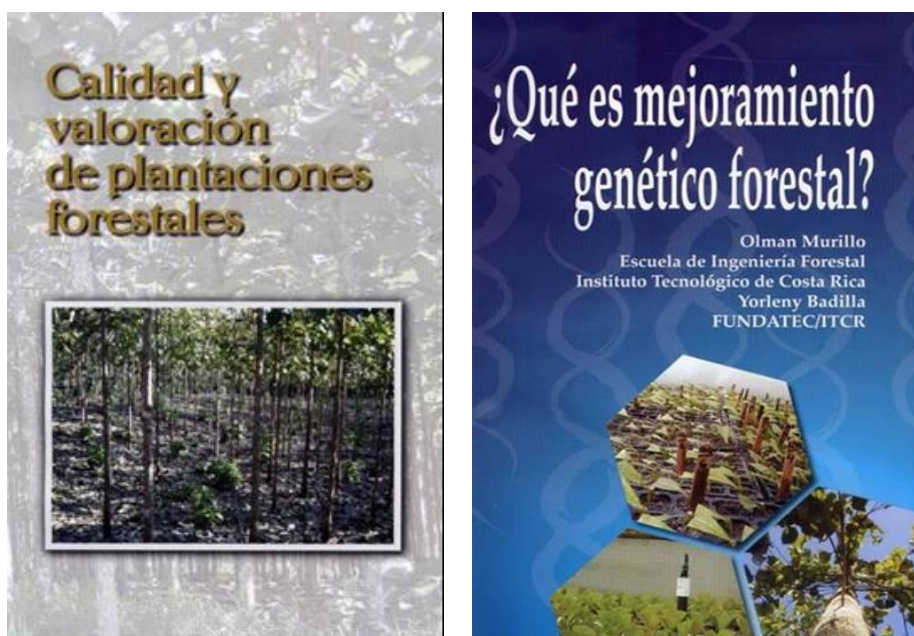
## Estado del Arte

Desde el año 2000 se comenzó formalmente el trabajo de campo bajo un modelo de vinculación academia-sector productivo, denominado GENFORES, en el que se han venido integrando buena parte de las empresas/organizaciones más importantes del desarrollo de la reforestación del país (ver cuadro 1). Mediante esta vinculación se ha logrado notables avances en **a)** tecnología de producción clonal a escala comercial en sistemas hidropónicos en invernadero; **b)** mejoramiento genético asistido por marcadores moleculares; **c)** desarrollo de técnicas de propagación de árboles *in vivo*, de bajo costo, capaces de ocurrir en cualquier parte del territorio nacional y durante todo el año; **d)** nuevas fuentes semilleras de material mejorado genéticamente en todas las especies utilizadas en reforestación comercial en el país (Gutiérrez *et al.*, 2003; Murillo y Guevara, 2013). Gracias a GENFORES se han desarrollado ocho proyectos de investigación en el ITCR, en los que se establecieron más de 150 ensayos genéticos en todo el territorio nacional y

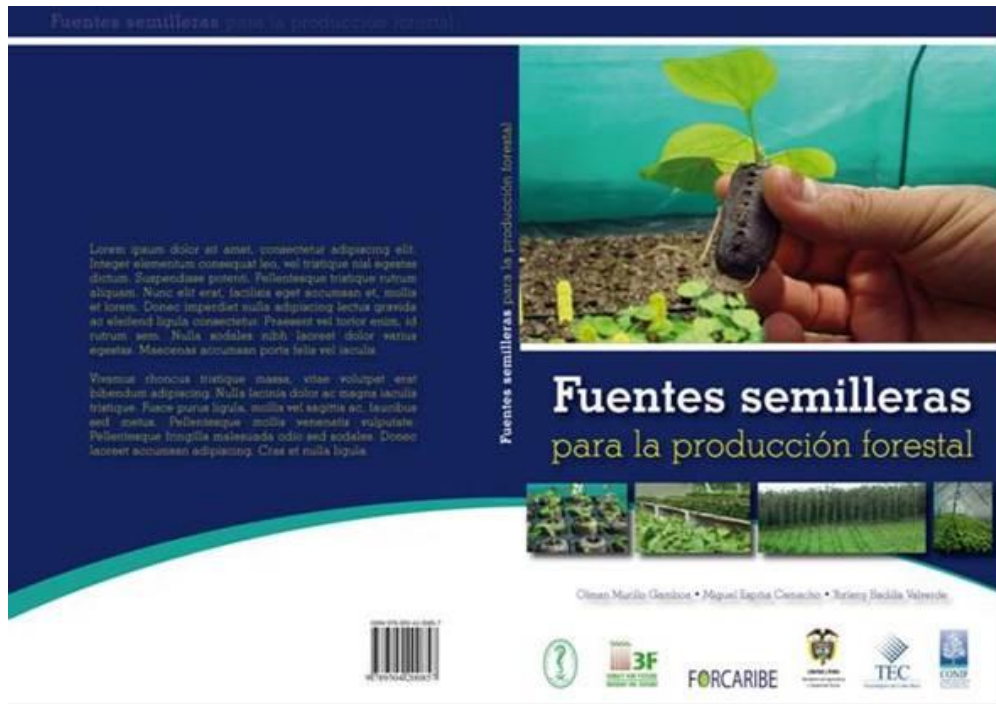
una amplia producción académica (36 artículos científicos, 5 manuales técnicos (Murillo *et al.*, 2003a, 2003b, Murillo y Badilla, 2004; Murillo y Badilla, 2005, **Figuras 1 y 2**, y un libro sobre fuentes semilleras forestales, Murillo *et al.*, 2012, **Figura 3**), 65 ponencias en congresos nacionales e internacionales, 20 tesis de forestal y biotecnología, ITCR), junto con cursos y actividades de capacitación y transferencia. Finalmente, **como principal logro** de este periodo de gestación de GENFORES, se logra **consolidar un modelo de vinculación universidad – sector productivo**, que le permite recibir al ITCR (a través de la FUNDATEC) fondos permanentes provenientes del sector productivo, para apoyar la investigación, así como la garantía de la aplicación directa de los resultados de las investigaciones, desarrollos e innovaciones en las empresas reforestadoras que conforman el grupo cooperativo, la mitad de ellas exportadoras de madera y semillas.



**Figura 1:** Manuales técnicos publicados para actividades de capacitación y transferencia a nivel nacional e internacional. El Manual de Reforestación Clonal ha tenido dos ediciones.



**Figura 2:** Manuales técnicos publicados para actividades de capacitación y transferencia a nivel nacional e internacional. El Manual de Calidad y Valoración de Plantaciones Forestales incluye un software editado varias veces al año desde el 2005.



**Figura 3:** Libro publicado sobre fuentes semilleras forestales (Murillo, Espitia y Castillo, 2012), el cual incluye 4 capítulos sobre técnicas de producción clonal forestal, como nueva fuente semillera disponible para la reforestación.

Gracias al financiamiento de la Fundación CRUSA, se inicia en el 2003 una alianza estratégica entre el ITCR y la UCR (Escuelas de Ing. Forestal y Biología, respectivamente) en investigación y desarrollo asistido por marcadores genéticos (moleculares), que ha continuado y fortalecido a la fecha. **Producto de esta alianza** se ha logrado crear el primer laboratorio en la región que ha iniciado y desarrolla servicios con marcadores moleculares a las empresas reforestadoras (de momento **a**) verificación anual de pureza clonal en sus colecciones y **b**) determinación de la identidad genética (huella genética) y registro de cada clon de las empresas; en proceso, **c**) medición de variabilidad genética de sus colecciones; **d**) verificación de cruzamientos controlados y otras aplicaciones en desarrollo). Este esfuerzo inicial permitió una importante producción académica y transferencia al sector (artículos, ponencias, dos simposios internacionales sobre silvicultura clonal en el 2005 y en el 2008, traída de expertos, tesis de Ing. en biotecnología y de Ing. forestal, días de campo y cursos de capacitación. Como trabajos recientes que capitulan la mayor parte de esta experiencia se puede remitir a: Rojas y Murillo, 2008; Rojas y Murillo, 2011; Murillo, 2011; Murillo y Badilla, 2012.

Con el poder de los marcadores genéticos, se ha postulado la posibilidad de lograr la selección temprana en programas de mejoramiento genético forestal. Significa esto, que podría pensarse a futuro, en relacionar caracteres juveniles con el desempeño futuro, cuando los árboles alcanzan dimensiones comerciales. La posibilidad de relacionar caracteres fisiológicos (tasa de fotosíntesis/respiración, densidad estomática, etc), podrían indicar desde el estadio de plántulas,



cuales individuos tienen un mayor potencial de crecimiento a futuro. Cuáles individuos son más eficientes fisiológicamente, capaces de hacer un mayor provecho de los recursos disponibles. Tema de vital importancia, cuando conocemos que buena parte de los sitios forestales registran por lo general marginalidad para el crecimiento (acidez del suelo, baja fertilidad, entre otros).

En los últimos años Costa Rica se ha constituido en la región latinoamericana, como el país con la mejor tecnología de plantaciones de teca, así como el país con las mejores fuentes semilleras y desarrollo de mejoramiento genético forestal. Las exportaciones de semilla de teca de los dos bancos de semillas más importantes (CATIE y el Centro Agrícola Cantonal de Hojanca) llegaron a alcanzar cifras de US \$200 000/año. En noviembre del 2008, el ITCR junto con las empresas miembro de GENFORES, celebró el II Simposio Internacional de Avances en silvicultura clonal, donde se compartió y mostró a la comunidad internacional, los nuevos desarrollos alcanzados en el país. Evento en el que participaron representantes de más de 40 empresas reforestadoras de 13 países de la región, junto con expositores de Brasil, Chile y Colombia, países que lideran junto con Costa Rica, el campo del mejoramiento genético forestal. Varias de las empresas miembro de GENFORES iniciaron desde el 2007 con exportaciones de material clonal de teca a Panamá, que se expandieron en el 2008 a Nicaragua y Colombia hasta exportar una cantidad superior a las 600 000 plantas, con un valor promedio de US \$ 0,5/planta (**Figura 4**). Las gestiones actuales permiten vaticinar un incremento constante en este nuevo negocio para el sector forestal costarricense. A nivel de asesorías en sistemas de producción clonal forestal, la Fundación del ITCR (FUNDATEC) registra visitas y asesoramiento de parte de técnicos costarricenses a empresas reforestadoras de Panamá, Honduras, Nicaragua, Ecuador, Colombia, Brasil, Guatemala y recientemente Perú. Por su parte, las empresas miembro de GENFORES han realizado asesorías profesionales con empresas en México, Panamá, Nicaragua, Ecuador y Costa Rica.



**Figura 4:** Nuevo producto de exportación desde el 2007. Material clonal certificado de la mejor calidad genética, producido en Costa Rica a través de la vinculación Academia (ITCR) – Sector Productivo (12 empresas).

## El problema

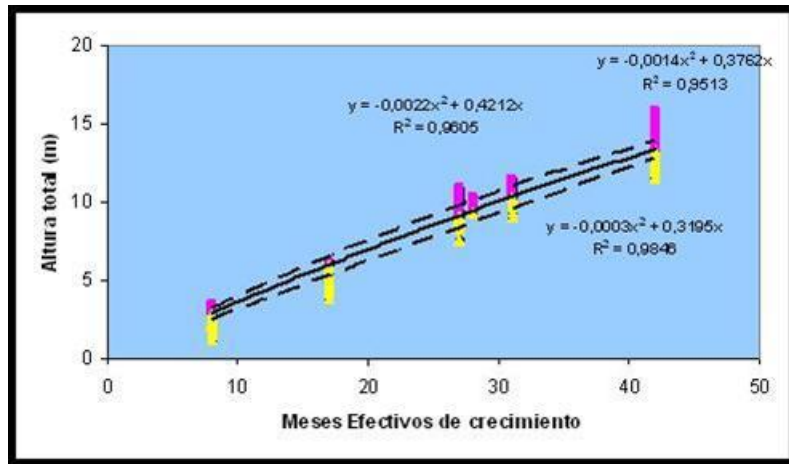
Los programas modernos existentes de mejoramiento genético forestal se basan en el establecimiento y manejo de minijardines clonales, conformados por colecciones de genotipos de características superiores (árboles plus) para la producción de madera. Estos árboles plus forman parte de una red nacional de empresas asociadas en forma cooperativa al Instituto Tecnológico (GENFORES), donde se ha venido adaptando tecnologías del campo agronómico a la producción clonal forestal en sistemas hidropónicos bajo ambientes protegidos (invernaderos, **Figura 5**). Estos sistemas producen de forma intensiva miniestaquillas cada 1 ó 2 semanas, que deberán enraizar en cámaras húmedas (minitúneles) en condiciones de temperaturas y humedad relativa altas. Sin embargo, la ausencia de conocimiento sobre el comportamiento en estrés de las plantas en estos sistemas, presentan constantes problemas fitosanitarios, temperaturas excesivas y cantidad de variables fisiológicas desconocidas y fuera de control en la mayoría de los casos. Se desconoce con exactitud aspectos de la lámina de riego adecuada en función de las condiciones climatológicas del sitio donde se localiza cada invernadero, así como la demanda nutricional óptima de las plantas en los minijardines clonales. Estas situaciones limitan el poder cumplir con metas de producción en cantidad y tiempo que demanda el sector de reforestación nacional y regional. Es indispensable superar esta restricción para que los programas de mejoramiento logren el impacto esperado.

Por otra parte, la selección de árboles superiores y su posterior verificación genética requiere de un periodo no menor a 6-7 años en trabajos rigurosos de campo. Por tanto, nuevos procedimientos o criterios de selección que permitan disminuir estos periodos de evaluación, tendrían un alto impacto en el mejoramiento genético forestal convencional. Se plantea la hipótesis de si parámetros fisiológicos, como tasa de fotosíntesis, de respiración o la conductancia estomática pudieran estar asociados con individuos superiores en productividad o generación de biomasa. De resultar cierta la hipótesis, el siguiente paso es revisar si estos parámetros fisiológicos se expresan y son verificables a una edad temprana, con lo cual se lograría acortar los procesos de selección. De manera paralela, encontrados aquellos genotipos superiores en alguno de estos parámetros fisiológicos, se podría revisar su estructura genética por medio de marcadores moleculares, con el objetivo de intentar asociarlos con los parámetros fisiológicos deseados. En este contexto, el uso de marcadores moleculares constituiría una herramienta valiosa para concentrar los esfuerzos en los individuos con mayor potencial fisiológico productivo.

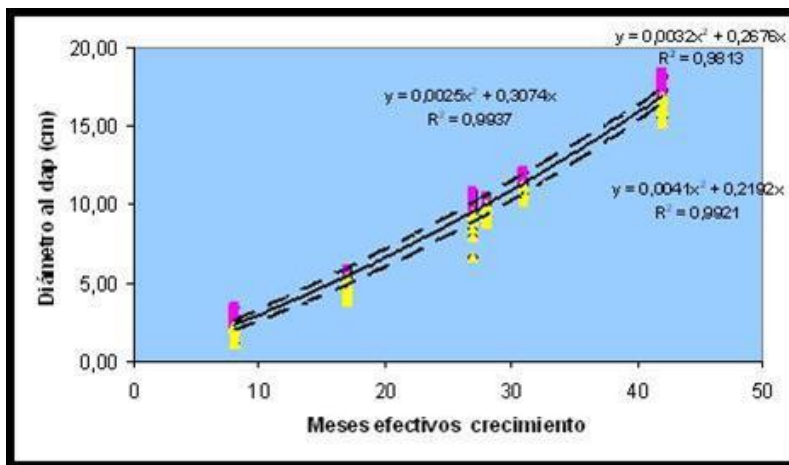


**Figura 5:** Minijardines clonales hidropónicos de especies forestales en ambientes protegidos para la producción clonal a escala comercial, Costa Rica.

Debe añadirse un desconocimiento del comportamiento y crecimiento inicial de las plantaciones forestales, en especial de los genotipos superiores utilizados hoy día como clones a escala comercial en Costa Rica. Como puede observarse en las figuras 6 y 7, las plantaciones forestales modernas pueden alcanzar más de la mitad de su dimensión comercial futura en los primeros 5 años de vida. Años clave para lograr una optimización de sus recursos genéticos a través de un mejor conocimiento y manipulación de la fisiología de la producción temprana. Los países con poca área para plantar especies forestales como Costa Rica, deben orientar su energía en la producción intensiva y de la mayor calidad de especies forestales de alto valor económico. Modelo estratégico similar al desarrollado en los últimos años en el país con el café. Significa esto, que de lograr optimizarse el crecimiento de la plantación durante los primeros 5 años, se podría reducir considerablemente el periodo de producción de madera bajo cultivo, con su consecuente impacto socio-económico. Hoy día, las plantaciones de teca y pílón cultivadas se manejan en turnos (periodos) de 18 a 22 años, las de melina en 10-12 años, que según nuestros ensayos genéticos en campo (Chacón, 2012, Salas, 2012), podrían reducirse a 15 y 16 años, y en el caso de melina a 8 años de edad. Con base en un nuevo conocimiento de los meses del año de mayores incrementos, por ejemplo, podría diseñarse actividades de manejo forestal más efectivas, como concentrar el control de malezas y la fertilización en esos meses. Los meses ideales para realizar la labor de podas (menor actividad) y raleos (mayor actividad), entre otras aplicaciones prácticas.



**Figura 6:** Crecimiento mensual en altura de plantaciones jóvenes de teca en Costa Rica (Murillo y Fallas, 2008).



**Figura 7:** Crecimiento mensual en diámetro de plantaciones jóvenes de teca en Costa Rica (Murillo y Fallas, 2008).

## Objetivos del proyecto

### Objetivo general:

Optimizar la tecnología de propagación vegetativa *in vivo* y de silvicultura clonal de teca y pilón, en el marco de un programa de vinculación Academia – sector productivo de mejoramiento genético forestal.

### Objetivos específicos:

1. Mejorar los sistemas de producción clonal *in vivo* de teca y pilón en ambiente protegido.

2. Mejorar las técnicas de silvicultura clonal intensiva de plantaciones jóvenes de teca y pilón con base en su potencial de crecimiento.
3. Determinar caracteres morfológicos de crecimiento temprano y su relación con sus patrones moleculares, como posibilidad de selección de genotipos superiores de las dos especies.
4. Capacitar al personal de las empresas reforestadoras en el mejoramiento de los sistemas de producción clonal para mejorar su competitividad y capacidad exportadora.

## Metodología

Este proyecto se llevó a cabo con apoyo del Programa de Conservación y Mejoramiento Genético Forestal que desarrolla desde hace 11 años el ITCR en conjunto con 12 empresas con quienes se ha conformado una organización denominada Cooperativa de Mejoramiento Genético (GENFORES), que busca garantizar una estrecha vinculación Universidad-Sector Productivo. De manera estratégica, el proyecto logró incorporar la especie melina en casi todas las investigaciones realizadas, ya que es la especie de mayor reforestación y proyección en el país y GENFORES cuenta con fortalezas en su mejoramiento genético (Murillo y Guevara, 2013).

### Objetivo específico 1:

#### **Mejorar los sistemas de producción clonal de teca y pilón en ambiente protegido**

Para el cumplimiento de este objetivo se establecieron una serie de ensayos en invernadero que generaron una importante cantidad de información. En el **Cuadro 1** se presenta los ensayos de producción clonal establecidos, con el detalle de los experimentos involucrados.

**Cuadro 1.** Ensayos experimentales establecidos en los invernaderos de producción clonal forestal establecidos en el campus del ITCR en Santa Clara, San Carlos, con las especies teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*) y pilón (*Hieronyma alchorneoides*) del 2011 al 2012.

Tipo de ensayo	Diseño experimental	Especies
Evaluación del efecto de la densidad de siembra en la productividad del minijardín clonal.	Bloques Completos al Azar (BCA) con 3 repeticiones. Los 4 tratamientos fueron 10x10 cm; 10x5; 7,5x7,5 y 5x5 cm. La unidad experimental consistió en 25 plantas madre y se tomaron datos cada 10 días durante 8 a 11 meses continuos.	Teca, melina y pilón
Evaluación del efecto de tres densidades de sombra en el enraizamiento y productividad del minijardín clonal.	BCA con 3 repeticiones. En este caso se construyeron 3 mini-invernaderos con una densidad de sombra diferente. Las densidades evaluadas (tratamientos) fueron 60% (testigo), 80% y 90%, todas con sarán color verde. Dentro de cada mini-invernadero se sembraron las 3 especies (25 plantas madre/spp) y las 3 repeticiones. El ensayo tomó muestras cada 10 días durante 8 meses. Se volvió a sembrar en octubre 2012 para tomar datos durante un segundo ciclo completo de producción.	Teca, melina y pilón.
Evaluación del efecto de la	Se construyeron 2 nuevos mini-invernaderos. Uno	Teca,

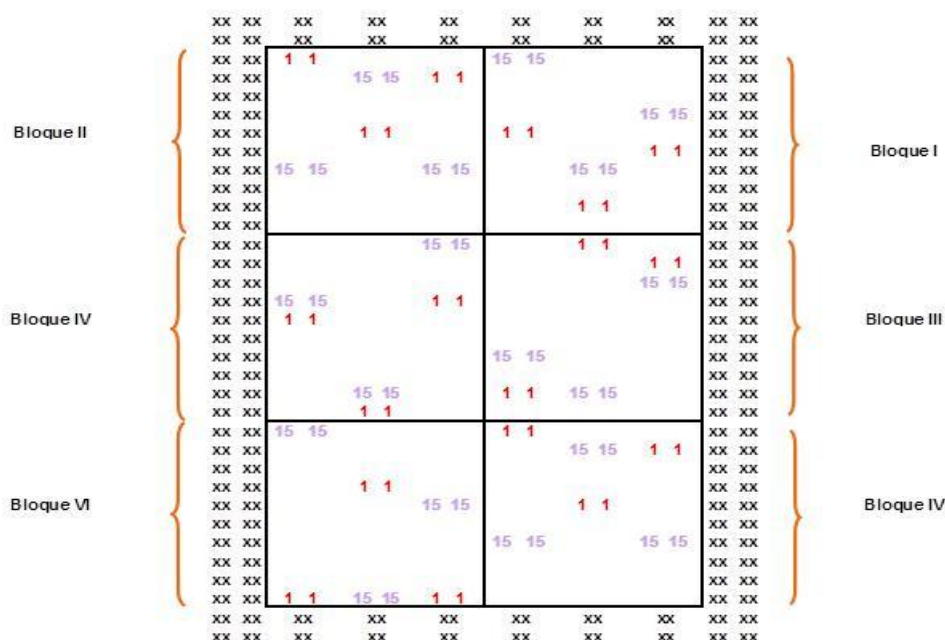
sombra en la productividad del minijardín clonal.	con sombra de sarán negro (70%) y otro sin sarán. BCA con. BCA con repeticiones. Dentro de cada mini-invernadero se sembraron las 3 especies (25 plantas madre/spp) y las 3 repeticiones. El ensayo tomó muestras cada 10 días durante 8 meses. Se volvió a sembrar en octubre 2012 para tomar datos durante un segundo ciclo completo de producción.	melina y pilón
Evaluación del fotoperiodo en la productividad del minijardín clonal.	Se instaló 3 sistemas de iluminación dentro de minitúneles, que permitieran mantener constante 3 fotoperiodos diferentes (tratamientos): 12 horas; 15 y 18 horas. Se incluyó como testigo (4to. Tratamiento) la luz natural del lugar. El sistema fue diseñado e instalado por 2 estudiantes de Ing. Electrónica como parte de su proyecto de graduación. Se utilizó un diseño BCA con 3 clones (que funcionaron como bloque) y 12 rametos/clon/fotoperiodo. Dentro de cada minitúnel y debajo de la iluminación se sembraron las plantas y se cosecharon cada 10 días durante 8 meses. El experimento se volvió a plantar en setiembre del 2012 con fines de validación de los resultados.	Teca, melina y pilón.
Efecto del sustrato en la productividad del minijardín clonal.	Se consiguieron canastas plásticas fuertes, de mayor altura que las tradicionales empleadas en enraizamiento y, se instalaron dentro de minitúneles como minijardín clonal temporal. Se evaluaron 3 sustratos: piedra quinta + arena + carbón en 3 proporciones diferentes (tratamientos): 33%+33%+33%; 50%+25%+25%; y 40%+40%+20% respectivamente. La unidad experimental fue de 12 plantas y las repeticiones fueron 3 clones. Se tomaron datos cada 10 días durante 6 meses. Es un ensayo que continúa actualmente.	Teca, melina y pilón
Evaluación de la productividad del minijardín clonal temporal vs. el minijardín clonal convencional.	BCA con 3 repeticiones (clones). Se utilizaron 25 plantas/clon de 3 clones/spp. Se sembraron en bandejas dentro de minitúneles con un espaciado de 10 x 5cm en sustrato de piedra 1/5 (50%), arena (25%) y carbón (25%). Se tomaron datos cada 10 días durante 14 meses.	Teca, melina y pilón.
Determinación de la curva de absorción de nutrimentos de los minijardines clonales.	Se establecieron 400 plantas madre/especie en un espaciado de 10 x 10cm como minijardín clonal en un bancal de arena dentro del invernadero convencional. Cada mes se cosecharon 50 plantas (primera vez), 40 (segundo mes), 30 y luego se mantuvo en 30 plantas. Las muestras se fraccionaron en brote, tallo y raíz. Se secaron hasta peso constante y se llevaron al laboratorio de suelos del Centro de Inv. Agronómicas de la Univ. de CR para su determinación.	Teca, melina y pilón.
Determinación de la sintomatología de deficiencias nutricionales en minijardines clonales de teca y melina	BCA con 4 repeticiones (el clon se utilizó como repetición, es decir, un mismo clon estuvo evaluado en ausencia de un nutrimento cada vez) y se utilizó la técnica del elemento faltante en un sistema hidropónico. El experimento se inició en el 2011 y continúa generando datos. Se evalúa la ausencia de cada uno de 12 elementos	Teca y melina

	<p>nutricionales (N-P-K, Mg-S-Ca y Mn-Fe-Cu-B-Mo-Zn). El ensayo evalúa la sintomatología visible en las hojas y raíces durante un periodo de 3 meses. Se ha repetido en 3 ocasiones a la fecha. Se evalúa además el efecto del elemento faltante en variables cuantitativas de crecimiento (altura total, número de hojas, largo de raíces y peso seco final).</p>	
<p>Determinación del consumo de agua en los minijardines clonales en sistemas hidropónicos</p>	<p>Se aprovecharon los ensayos de determinación de la curva de absorción para obtener muestras bisemanales del consumo de agua en el sistema. Se tomaron muestras del volumen de un beaker de 10ml cada vez, se tomaron lecturas de peso postriego y luego minutos antes de un nuevo riego. El experimento se volvió a reiniciar en mayo 2013 para intentar completar una mayor cantidad de datos con no menos de 8 meses de información.</p> <p>Se instaló un lisímetro dentro del invernadero, con capacidad para contener dos maceteros grandes. En cada macetero se sembraron 10 plantas madre de teca y el instrumento generó lecturas diarias durante 8 meses. El experimento se volvió a establecer en mayo del 2013 con el objeto de generar información durante un segundo año de mediciones.</p>	<p>Teca</p>

### **Objetivo específico 2:**

#### **Mejorar las técnicas de silvicultura clonal intensiva de plantaciones jóvenes de teca y pilón con base en su potencial de crecimiento.**

Este objetivo fue abordado con base en una red de ensayos clonales establecidos en varias empresas de los miembros de GENFORES de las especies teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*) y pilón (*Hieronyma alchorneoides*), tal y como se describe en el **Cuadro 2**. El diseño experimental empleado es el utilizado por GENFORES para sus ensayos genéticos, tal y como se muestra en la **Figura 8**. Todos los ensayos genéticos ya establecidos fueron medidos durante el proyecto, algunos inclusive tuvieron dos mediciones. Los ensayos nuevos establecidos durante el proyecto tuvieron de 1 a 2 mediciones, dado el corto periodo de 2 años para abordar este objetivo.



**Figura 8:** Diseño experimental desarrollado por GENFORES (Murillo y Badilla, 2004) para la evaluación genética de materiales. Cada accesión se evalúa en 3 ó 4 parejas no contiguas y distribuidas aleatoriamente dentro de cada bloque (ejemplos accesión 1 y 15 con 3 parejas/bloque cada uno).

**Cuadro 2.** Ensayos genéticos disponibles y establecidos durante el proyecto como apoyo a las investigaciones en silvicultura clonal. Todos los ensayos se basaron en el diseño experimental utilizado por GENFORES, que consiste en Bloques Completos al Azar, con 6 repeticiones y los materiales evaluados en 2-3 parejas de rametos separados y aleatorizados dentro de cada bloque (ver Figura 8). La unidad experimental o parcela consiste en 4 a 6 rametos/clon/repetición.

Especie	Tipo de ensayo	Descripción del ensayo
Teca	Ensayo de progenie	Establecidos en Hojancha, Santa Cruz y San Mateo con 11 años de edad. Se evalúan 28 familias superiores.
	Ensayo clonal	Establecido en Pueblo Viejo de Nicoya, se evalúan 33 clones de la zona norte que compiten con la primera semilla mejorada genéticamente en Huerto Semillero de Hojancha. Tiene 6 años de edad
	Ensayo clonal	Primer ensayo clonal de intercambios GENFORES, donde se evalúan 25 clones (5 por empresa) y 2 testigos (semilla mejorada del CACH, Hojancha), con 5 años de edad. Ensayo establecido en Finca Salamá (Osa) y en El Concho, Pocosol, San Carlos.
	Ensayo clonal	Primer ensayo clonal establecido con la colección de la empresa BARCA. Se evalúan 30 clones y se establece en el 2011 en la Península de Osa, en cooperación con el INISEFOR de la UNA.
	Ensayo clonal	Establecido en México de Upala en julio 2012 en la empresa Puro Verde. Contiene 42 clones seleccionados en suelos ácidos de la zona norte.
Melina	Ensayo clonal	Establecido en Siquirres, Limón con 3 años de edad y se evalúan 25 clones. El testigo es la semilla mejorada genéticamente del antiguo Huerto Semillero de Ston Forestal (hoy día CATIE).
	Ensayo clonal	Consiste en una colección de ensayos establecidos en cooperación con el INISEFOR en La Palma, península de Osa y



		en Finca Puntarenas. Con edades de 2,5 y 4,5 años y se evalúan 15 clones seleccionados en San Carlos, zona norte, 15 clones seleccionados en Palmar Sur de Osa por Coopeagri y 15 clones seleccionados por BARCA del antiguo Programa de Ston Forestal, en Finca Salamá.
	Ensayo clonal	Establecido por Coopeagri en el 2010 en La Ceniza de Pérez Zeledón, con 35 clones, 25 seleccionados en la zona de Palmar sur y otros 15 seleccionados en la zona norte de CR.
Pilón	Ensayo clonal	Establecido en el campus del ITCR y replantado en el 2012. Contiene 18 clones seleccionados en Santa Clara de Carlos.
	Ensayo clonal	Establecido en cooperación con el INISEFOR en la península de Osa, zona sur del país. Contiene 15 de los 18 clones seleccionados por el ITCR en Sta. Clara, San Carlos.
	Ensayo clonal	Establecido en México de Upala en octubre del 2012 en la empresa Puro Verde. Contiene los mismos 18 clones seleccionados en Santa Clara, San Carlos.
TOTAL	14 ensayos	

Con los ensayos repetidos en varios ambientes se pudo establecer la magnitud de la interacción genotipo x ambiente, así como poder separar los efectos ambientales de los genéticos. Estos ensayos se encuentran establecidos en los terrenos de organizaciones miembro de GENFORES. Todos los ensayos fueron analizados mediante el software SELEGEN versión 2011, especializado en ensayos genéticos (Resende, 2007).

### Modelo Estadístico

$y = Xr + Zg + Wp + e$ , en que “y” es el vector de los datos, “r” es el vector de los efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), “p” es el vector de los efectos de la parcela, “e” es el vector del error o residuos (aleatorios). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los referidos efectos (Resende, 2006).

### Utilización de dendrómetros

No fue hasta el segundo semestre del 2012 que se logró conseguir dendrómetros y se inició su instalación solamente en plantaciones y ensayos clonales de teca. Los ensayos clonales de pilón son todavía muy jóvenes y sus diámetros no permiten en muchos casos la colocación de estos instrumentos. Los dendrómetros se instalaron en Finca Salamá (Osa), México de Upala (frontera norte), Finca Paloarco (Nandayure) y en San Rafael de Cutris (San Carlos). Los sitios representan los regímenes de clima extremos y representativos del país para las plantaciones de teca (zonas más húmedas o pluviales como Salamá y zonas más secas como Nandayure con 6 meses secos). En cada sitio se instalaron en 20 individuos de la misma edad, 10 con floración y 10 sin floración. Hasta la fecha se tienen datos de 8 meses en campo. En todos los sitios se cuenta con una estación climatológica local con información mínima de precipitación y a veces de temperatura.

### **Objetivo específico 3:**

**Determinar caracteres morfológicos de crecimiento temprano y su relación con sus patrones moleculares, como posibilidad de selección de genotipos superiores de las dos especies.**

#### **Relación entre la información de marcadores moleculares vs caracteres cuantitativos y cualitativos en árboles superiores**

De las colecciones genéticas de teca de las empresas BARCA, Panamerican Woods (PAW) y Precious Woods (PW), se determinó el genotipo de cada uno de sus clones, para un total de aproximadamente 135 genotipos. El genotipado de los clones de teca se realizó con base en 8 microsatélites (6 desarrollados por el CIRAD, Francia Verhaegen et al., 2005; y 2 microsatélites desarrollados por el grupo de Malasia, sin publicar). El procedimiento mejorado de extracción del ADN, amplificación (PCR) y posterior corrido de electroforesis siguió los procedimientos estándar descritos por Rojas et al (2007) y Rojas y Murillo (2011). El trabajo de genotipado de las colecciones genéticas fue realizado en el laboratorio de genética molecular de GENFORES localizado en el Centro de Inv. en Integración Bosque Industria, campus del ITCR en Cartago. Las colecciones de PAW y PW cuentan con suficiente información de campo donde se han evaluado caracteres cuantitativos y cualitativos de importancia económica (crecimiento general del DAP, altura comercial y volumen comercial, así como calidad del árbol, según procedimientos estándar para ensayos genéticos, ver Pavlotzky y Murillo, 2012). La colección genética de teca de BARCA (establecida en península de Osa) cuenta solamente con datos de poco más de 2 años en campo, por lo que no se utilizaron en el análisis.

Con el fin de generar un procedimiento estándar de análisis, se trabajó de manera estratégica con los 50 clones de PAW, debido a que se contaba con el 100% de su información genotípica y de campo. **La incapacidad por enfermedad de Fabiana Rojas, nuestra biotecnóloga, durante los últimos 13 meses del proyecto**, limitó la posibilidad de extender el trabajo con otras colecciones de teca y con el pilón.

#### **Análisis de datos**

Los datos fueron analizados tanto como una sola población, así como cada individuo tratado como una población. Los datos de campo (cuantitativos y cualitativos) fueron unidos con los generados por los marcadores genéticos, donde cada uno de los ocho microsatélites fue registrado como una variable y el genotipo fue introducido como un valor para cada individuo. De esta manera se generó una matriz de datos conjunta con datos de campo y datos moleculares (**Cuadro 3**). Con el fin de poder analizar los datos bajo un mismo formato (categórico y cuantitativo), la base de datos se organizó y analizó de dos formas: a) Todos los datos fueron categorizados y, b) todos los datos fueron utilizados con sus valores cuantitativos. La categorización de los datos de campo se determinó en 3 grupos (alto = 1, medio = 2 y bajo valor = 3), según su posición en el ámbito completo de valores de cada carácter, dividido arbitrariamente en  $x < 33\%$ ,  $33\% < x < 67\%$  y  $x > 67\%$ .

**Cuadro 3.** Ejemplo de organización de la matriz de datos para el análisis combinado de caracteres de campo junto con genotipos de ocho microsatélites. Los datos de los caracteres cuantitativos han sido categorizados en valores de 1 a 3.

Bloque	Clon	Dap	Altura com.	Vol. Com.	Calidad	Marcador 1	Marcador 2
1	1	1	1	1	100	265265	215215
1	2	2	2	1	75	265235	215198
1	3	2	1	2	33	265245	215205

Mediante el software SELEGEN (Resende, 2007) se analizaron todos los caracteres juntos (5 cuantitativos y 8 moleculares), a los que se les determinó los parámetros genéticos clásicos como heredabilidad individual, heredabilidad media del clon/familia, coeficiente de variación genético, exactitud y precisión de estimación, así como los componentes de varianza mediante el procedimiento REML en SELEGEN, tal y como se describen en Pavlotzky y Murillo (2012). Con el mismo software SELEGEN, se determinó la correlación genética de Spearman entre todos los 13 caracteres analizados.

Mediante el software GenAlex versión 6.3 se analizó la base de datos para obtener los parámetros clásicos poblacionales como frecuencias alélicas, frecuencias genotípicas, variabilidad genética, equilibrio Hardy-Weinberg, valor F, distancia genética, parentesco, entre otros. Se procedió también a agrupar los clones mediante procedimientos de análisis multivariado como el Contenido de Información Polimórfica

$$CIP_j = 1 - (\sum p_i^2),$$

$p_i$  = frecuencia  $i$  de cada uno de los alelos registrados en el locus  $j$ .

### **Relación potencial juvenil-adulto en caracteres fisiológicos**

Dado el largo plazo del cultivo de madera, buena parte de las estrategias de mejoramiento genético forestal se concentran en como lograr acortar los periodos de selección, para así poder avanzar hacia las próximas generaciones de mejoramiento genético. Por lo general, los trabajos han buscado correlaciones genéticas juvenil-adulto con caracteres de crecimiento y también caracteres morfológicos o cualitativos. Sin embargo, poco se ha realizado con parámetros fisiológicos, que se espera manifiesten un patrón de expresión desde temprana edad, dado su carácter primordial en el funcionamiento de las plantas. Por tanto, en el proyecto se realizaron varios esfuerzos importantes para tratar de incursionar en el campo de la fisiología de árboles o leñosos, determinar los primeros patrones y parámetros, para luego tratar de establecer relaciones juvenil-adulto con un grupo de 5 clones de teca, melina y pilón.

Dado que en el 2011 no se tenía ningún especialista en fisiología en el ITCR, se logró traer al país al Dr. Alfredo Jarma (fisiólogo de la Facultad de Agronomía, Universidad de Córdoba, Colombia), por medio de nuestra empresa miembro de GENFORES en Colombia (3F/Kanguroid) y de nuestra Oficina de Cooperación Internacional en la VIE. El Dr. Jarma impartió varias charlas sobre el tema de la fisiología de la producción y sus posibles aplicaciones para seleccionar materiales que

toleren el cambio climático, así como una capacitación en el uso de los nuevos equipos/laboratorios de campo como el IRGA. Con su ayuda se tomaron mediciones fisiológicas de tasa de fotosíntesis (PAR), tasa de respiración y de conductancia estomática, principalmente. Las mediciones se tomaron de plantas presentes en el invernadero de investigación y desarrollo clonal forestal en nuestra sede en Sta. Clara, San Carlos. Estas plantas pertenecían a 5 clones de teca que estuvieran representados en ensayos clonales en campo en la zona de San Carlos, 5 clones al azar de melina y 5 clones al azar de pilón. Las mediciones se tomaron de varios rametos por clon y en diferentes estadíos (planta madre en el minijardín clonal, planta enraizada y transplantada en Jiffy, planta lista para ir a campo), tanto dentro como fuera del invernadero (plena exposición solar). Se tomaron datos tanto bajo la radiación local existente, como bajo una radiación máxima promedio in situ, con el fin de poder comparar entre genotipos.

#### **Objetivos específicos 4:**

#### **Capacitar al personal de las empresas reforestadoras en el mejoramiento de los sistemas de producción clonal para mejorar su competitividad y capacidad exportadora.**

Como parte esencial de este tipo de proyectos de vinculación academia-sector productivo, se diseñó una estrategia de divulgación y capacitación a los distintos niveles técnicos de las empresas miembro de GENFORES y del sector forestal costarricense en general. La estrategia general de capacitación y divulgación se basó en las siguientes acciones:

- 1) Capacitación permanente *in situ* en las visitas de rutina a cada una de las empresas miembro de GENFORES. Las empresas radicadas en Costa Rica recibieron al menos 2 visitas/semestre, mientras que las empresas extranjeras recibieron visitas 1 a 2 veces/año. En las visitas se revisaban los protocolos básicos de propagación clonal, se hacían observaciones y recomendaciones de mejoramiento y se divulgaban los nuevos descubrimientos o mejoras desarrolladas durante el proyecto.
- 2) Capacitación del personal técnico de las empresas miembro de GENFORES u otras empresas en nuestras facilidades en la sede del ITCR en Santa Clara. Durante el desarrollo del proyecto se logró consolidar nuestras instalaciones como un laboratorio permanente de Investigación, Innovación y Desarrollo en silvicultura clonal.
- 3) Participación en actividades de divulgación/capacitación y días de campo organizados por algún miembro de GENFORES. En particular, se participó en curso sobre producción clonal y mejoramiento genético organizado por el Centro Agrícola Cantonal de Hojanca (CACH) para personal técnico de la zona de Guanacaste, así como en otra actividad de organización y capacitación de los viveristas de la zona de Hojanca. Se participó como instructor en dos días de campo organizados por ASIREA sobre plantaciones clonales en la zona caribe del país.
- 4) Organización de simposios y cursos práctico-teóricos en la sede del ITCR en Santa Clara. Se organizaron dos simposios y dos cursos durante el proyecto, **todos eventos a nivel internacional**. En estos eventos se planificó la participación como instructores, no solo de

los investigadores del ITCR, **sino también de los mejores técnicos de las empresas miembro de GENFORES.**

- 5) Participación en numerosos congresos nacionales e internacionales, en charlas en universidades, donde se divulgó ampliamente los avances del proyecto.
- 6) Relacionadas directamente con el proyecto, se participó en la orientación y co-orientación de más de 12 tesis: a) de pregrado del ITCR (Forestal, Biotecnología y Electrónica), b) de la UNA (Forestal), c) de maestría académica (Agronomía, UCR: Agronomía, Universidad de Córdoba, Colombia) y d) del doctorado interuniversitario (DOCINADE).
- 7) Elaboración de un libro sobre Fuentes Semilleras Forestales.
- 8) Participación directa de los estudiantes de los cursos de Mejoramiento Genético Forestal y de Manejo de Plantaciones en varios de los trabajos e investigaciones del proyecto durante los dos años.
- 9) Participación como instructores principales del curso Centroamericano de Manejo de Plantaciones Forestales, organizado por el proyecto FINNFOR del CATIE en los años 2010 y 2011, donde se abordó parcialmente el tema general del mejoramiento genético forestal y la silvicultura clonal.

## Resultados

De manera general debe mencionarse, que la eliminación de un año del proyecto propuesto ante la VIE, limitó seriamente la posibilidad de poder publicar los resultados de las investigaciones. El sistema clonal forestal sigue ciclos de producción anual (aproximadamente 8 a 10 meses), que requieren de al menos de 2 ciclos de mediciones para validación de resultados. El proyecto logró en general generar la mayor parte de la información planeada al término de los dos años. Sin embargo, es hasta este momento en que se trabaja en su publicación formal como artículos científicos. Algunos de los datos apenas han finalizado sus análisis.

Debe también mencionarse que el proyecto sufrió un trastorno durante el 2012 que limitó seriamente sus alcances. La Ing. Fabiana Rojas se incapacitó por enfermedad desde abril a la fecha, la Ing. Yorleny Badilla goza de beca de estudios de posgrado en Brasil que la separó del proyecto desde el II semestre del 2012 y mi persona, como coordinador general, tuve una ausencia de dos meses (junio a agosto, 2012) durante una pasantía en la Universidad de Göttingen, Alemania, con el fin de poder iniciar con análisis complejo de los datos de campo vs los datos moleculares del proyecto.

A pesar de estas dificultades, el proyecto logra cumplir con la mayor parte de sus objetivos, metas y productos esperados de investigación como a continuación se muestra, con excepción del trabajo con los marcadores moleculares que debió restringirse a teca.

### **Objetivo específico 1:**

#### **Mejorar los sistemas de producción clonal de teca y pilón en ambiente protegido**

Los mejores resultados obtenidos de las investigaciones fueron incluidos en varios de los capítulos del libro “Fuentes Semilleras Forestales” de Murillo, Espitia y Castillo (2012), así como en el capítulo de “Mejoramiento Genético de teca” de Murillo et al, del libro colectivo que edita actualmente el CATIE/FAO sobre Teca; así como también en los dos simposios, en el curso práctico-teórico del 2013 y en varias de las ponencias en congresos nacionales e internacionales. En el apéndice se incluyen los capítulos de los dos libros mencionados, con la información sobre este objetivo.

Sin embargo, a continuación se muestran los resultados de mayor relevancia obtenidos en varios de los experimentos desarrollados durante la investigación.

#### **Efecto del tipo y densidad de sombra en la productividad de los minijardines clonales de teca, melina y pilón:**

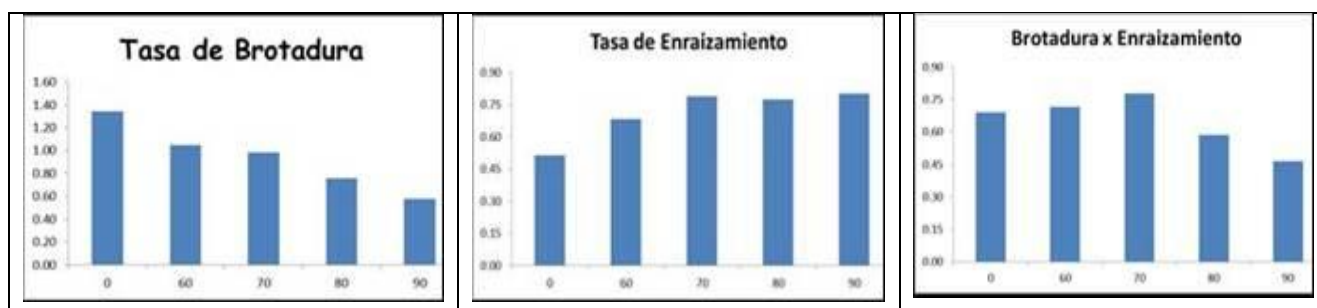
En la **Figura 9** se muestra los 5 mini-invernaderos que fueron construidos con los fondos del proyecto, con el objetivo de poder investigar el efecto de la densidad y tipo de sombra en la productividad de los minijardines clonales. Estos mini-invernaderos logran simular condiciones muy semejantes a la producción ordinaria en invernaderos condicionales. Durante el desarrollo del proyecto, se logró establecer experimentos durante más de 18 meses y aún continúan arrojando

nueva información, que permitirá validar los resultados que se muestran a continuación con el primer ciclo de datos de 8 meses.



**Figura 9.** Mini-invernaderos con diferentes intensidades de sombra (arriba, 60%, 80% y 90%; abajo, 0% y 70%) construidos para experimentación en producción clonal, en el sector de invernaderos forestales de la sede del ITCR en Santa Clara, San Carlos.

En la **Figura10** se muestra el patrón general encontrado en los minijardines clonales de teca, melina y pilón durante las investigaciones. De forma evidente, la tasa de brotación tiende a declinar conforme aumenta la intensidad de sombra, pero de manera inversa, la tasa de enraizamiento del brote producido bajo condiciones de sombra tiende a aumentar a mayor densidad de sombra. Si se obtiene la tasa de productividad (brotadura x enraizamiento), se puede entonces determinar que la mejor densidad de sombra oscila entre un 60 a un 70%, aunque las diferencias no han sido significativas. Este experimento se encuentra en su segundo año o ciclo de producción. Se volvieron a sembrar todos los minijardines clonales y los nuevos datos serán utilizados para validar estos patrones encontrados.

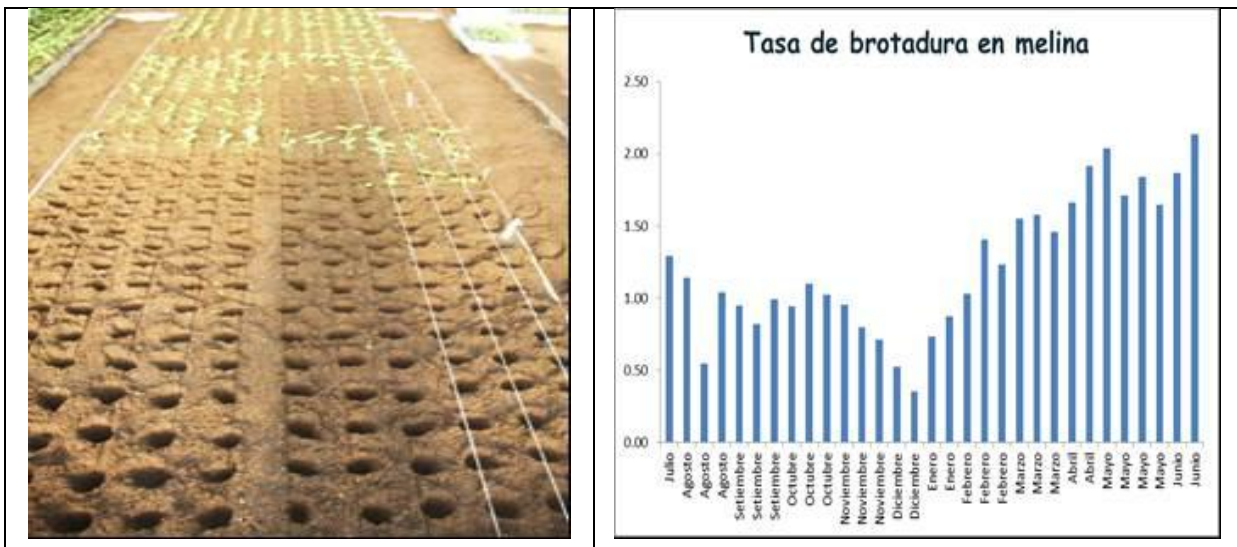


**Figura 10.** Efecto de la intensidad de sombra en la tasa de brotación del minijardín clonal, en la tasa de enraizamiento de sus brotes y en la productividad del sistema clonal de teca, en San Carlos, zona norte de Costa Rica.

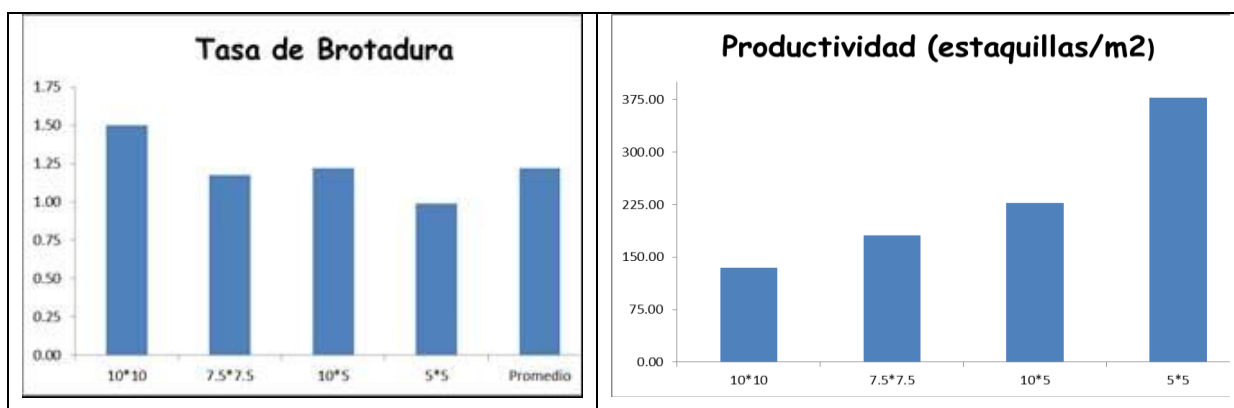
#### Efecto de la densidad de siembra en la productividad de los minijardines clonales

Como parte de las investigaciones realizadas, se estableció un ensayo con cuatro espaciamientos para las tres especies, con el objetivo de buscar un espaciamiento que logre aumentar la productividad por  $m^2$  en los minijardines clonales. La **Figura 11** recoge los principales resultados. Puede observarse como la tasa de brotación de melina oscila fuertemente según la época del año para un mismo espaciamiento testigo (10 x 10 cm). Principalmente en los meses de noviembre a enero, la melina se estresa y reduce dramáticamente su tasa de producción de brotes en los minijardines clonales. Este fenómeno lo hemos visto asociado a la época del año de mayor incidencia de lluvias, alta nubosidad y mal tiempo en general en la zona de San Carlos.

De manera general se observó un patrón bien definido, donde a mayor densidad de siembra, las plantas madre producen menor cantidad de brotes/planta, pero dado que mantienen una mayor cantidad de plantas madre/ $m^2$ , como resultado se obtuvo siempre y para las tres especies, que a mayor densidad de siembra mayor producción de miniestaquillas útiles/ $m^2$  (ver **Cuadro 5**). De manera esperada, a mayor densidad de siembra, el minijardín clonal requiere de un manejo más intensivo, las cosechas deben ser más frecuentes para reducir la competencia y la nutrición y riego, deben ser cuidadosamente mejorados, dada la alta competencia que se establece en el sistema.







**Figura 11.** Efecto de la época del año en la tasa de producción de brotes del minijardin clonal (arriba, der.). Efecto del espaciamiento en la tasa de producción de brotes y en la productividad del minijardin clonal (abajo).

Las diferencias fueron claramente significativas entre los espaciamientos investigados, tal y como se muestra en el ANDEVA que aparece en el **Cuadro 4**.

**Cuadro 4.** Análisis de varianza del efecto de cuatro espaciamientos en la productividad (tasa de brotes x tasa de enraizamiento) de minijardines clonales de melina (*Gmelina arborea*) en Santa Clara, San Carlos.

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	P >	Valor crítico > F
Repeticiones	0,2117	2	0,1059	13,51	0,006	5,1432
Espaciamientos	0,3998	3	0,1333	<b>17,01</b>	0,0024	4,7571
Error	0,0470	6	0,0078			

En el **Cuadro 5** puede verse también observarse como la sobrevivencia de plantas madre disminuyó conforme aumentó la densidad de siembra. Hoy día, la mayoría de las empresas miembro de GENFORES están utilizando el espaciamiento 5 x 5cm ó 5 x 7,5 cm en teca y el espaciamiento 5 x 10cm en melina, dada su tipo de hoja de mayor tamaño que la de teca.

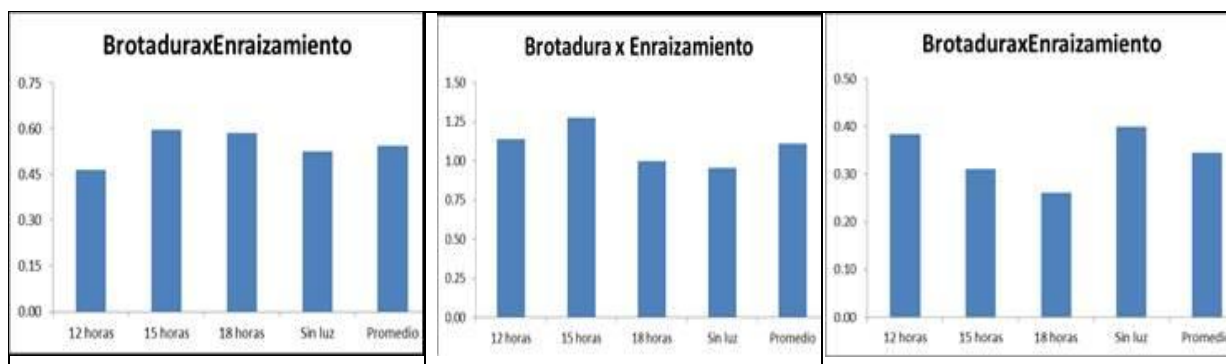
**Cuadro 5.** Efecto del espaciamiento en la tasa de brotadura, sobrevivencia y productividad del minijardín clonal de teca (*Tectona grandis*) en Santa Clara, San Carlos.

Espaciamiento	Tasa de Brotadura	Sobrevivencia	Plantas/m <sup>2</sup>	Productividad
10*10	1,13	0,98	100	110
7,5*7,5	0,99	0,88	178	154

10*5	0,91	0,88	200	160
5*5	0,77	0,86	400	266

### Efecto del fotoperiodo en la productividad de los minijardines clonales

Uno de los experimentos más interesantes fue el que simuló un cambio en el fotoperiodo para evaluar si afectaba la productividad de los minijardines clonales. Este experimento tuvo varios tropiezos debido al sistema eléctrico que debió instalarse con ayuda de dos tesis (trabajos de graduación) de estudiantes de último año de Ingeniería en Electrónica y las dificultades operativas dada la exposición al agua, las altas temperaturas y humedad relativa en general dentro de los minitúneles, así como en la consecución de una luz artificial que estimulara la fotosíntesis de las plantas. Después de más de 1 año de pruebas, el ensayo logró generar un primer ciclo de datos de aproximadamente 8 meses. En estos momentos continúa el ensayo con una renovación total de los minijardines clonales.



**Figura 12.** Efecto del fotoperiodo en la productividad de minijardines clonales hidropónicos de pilón, melina y teca, respectivamente, en Santa Clara, San Carlos, zona norte de Costa Rica.

En la **Figura 12** se puede observar como en todos los casos, bajo 15 horas de luz los minijardines clonales de pilón, melina y teca aumentaron levemente su productividad, con excepción de teca que disminuyó. Sin embargo, el tratamiento “Sin Luz” o testigo, registró valores de productividad similares a los tratamientos de 15 y 18 horas. El nuevo ciclo de datos está de momento generando nueva información que se espera permita dilucidar estos patrones obtenidos.

### Desarrollo de un Índice de Productividad Clonal.

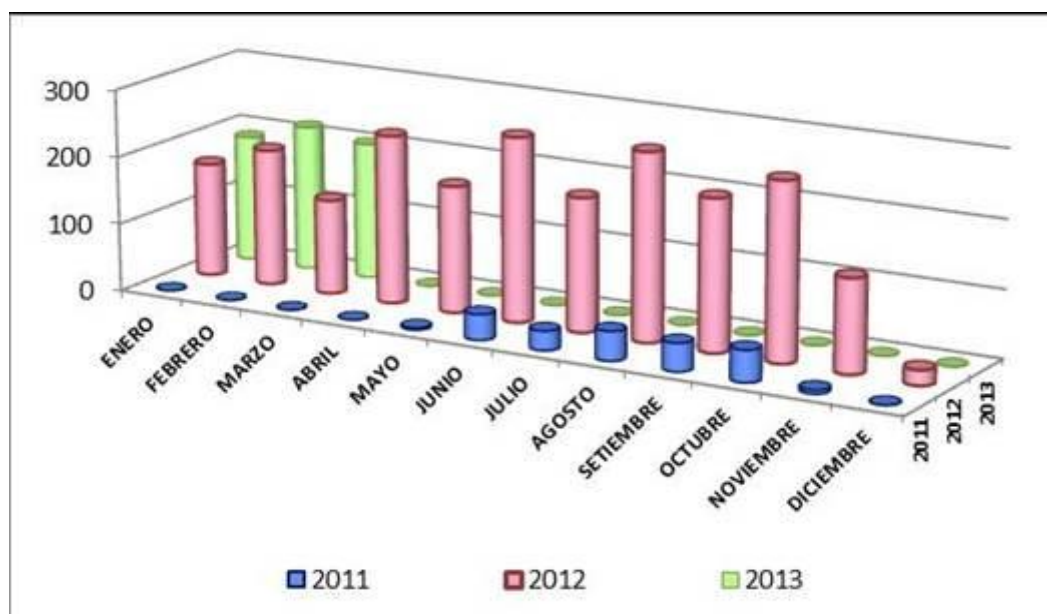
Dados los avances en manejo y productividad que se han obtenido en los minijardines clonales, como parte de los programas de mejoramiento genético, surge entonces la necesidad de poder cuantificar la magnitud de las mejoras, la tasa de cambio entre sistemas de producción o entre invernaderos u organizaciones. En el **Cuadro 6** se sintetiza el Índice de Productividad Clonal propuesto y los criterios o indicadores en que se basa, donde se utiliza para precisamente evaluar la magnitud de la evolución entre los jardines clonales iniciales (años 1999 a 2002) a plena

exposición ambiental, versus los sistemas ya de minijardines clonales en ambiente protegido o invernadero (del 2002 al 2010), para terminar con el último tipo de minijardin denominado como temporal por su ubicación dentro de un minitúnel.

**Cuadro 6.** Utilización del Índice de productividad clonal (IPC) para comparar la evolución de los minijardines clonales de teca en los últimos 10 años en las empresas miembro de GENFORES en Costa Rica.

Parámetros	Jardin Clonal	Minijardin Clonal	MJ Clonal Temporal
Frecuencia de cosecha (No/mes)	1.5	2	3
No plantas madre/m <sup>2</sup> de minijardín	6.25	200	400
Mortalidad en el minijardín (%)	5	8	15
Producción de Brotes/planta madre/cosecha	2	1	0.5
Tasa de enraizamiento (%)	60	90	98
Control de calidad Post-transplante (%)	10	9	8
Tiempo de producción de una estaquilla (meses)	2	1.5	1.25
<b>Índice de Productividad Clonal = Plantas Efectivas/m<sup>2</sup>/mes</b>	<b>5</b>	<b>201</b>	<b>368</b>

Puede observarse entonces que el IPC registra no solo la productividad por m<sup>2</sup>, sino también introduce la variable tiempo (mes) que permite diferenciar entre sistemas de producción basados en cosechas cada 15 días, vs cosechas cada 10 días o aún semanales. En la **Figura 13** se muestra una interesante aplicación del IPC realizada por ASIREA (empresa miembro de GENFORES), que les permitió ver la mejoría de su propio minijardín clonal con la puesta en marcha de una serie de mejoras en su paquete tecnológico.



**Figura 13.** Utilización del Índice de Productividad Clonal para analizar la respuesta en la productividad mensual del minijardín clonal de melina de ASIREA (empresa miembro de GENFORES, Guápiles, caribe de Costa Rica) como respuesta a mejoras en el paquete

tecnológico aplicado (Barrantes, P. 2013. En: Curso de Producción clonal de GENFORES, 23-24 abril, sede ITCR en Santa Clara, San Carlos).

Desarrollo de un modelo y una aplicación en EXCEL para la estimación de costos de producción clonal.

A pesar de no estar explícito ni incluido dentro de los objetivos del proyecto, por su propia naturaleza siempre es importante poder abarcar algo del tema relacionado con estimación de costos, intentar contestar las preguntas, ¿cuánto cuesta producir un clon de un árbol plus?. Para esto se desarrolló y refinó una aplicación programada en ambiente EXCEL, que permitiera poder simular diferentes escenarios de costos y modalidades de producción clonal.

El sistema permite poder estimar los costos de producción de plantas clonadas ya listas para plantar, como producto principal. Así también permite estimar los costos de producción de un nuevo producto que hemos denominado “almácigo” o miniestaquilla, apenas iniciando con la aparición de raíces y brotes. El sistema tiene integrado una base de información de una gran diversidad de ítemes relacionados con agroquímicos, Jiffys o pellets, y quizá lo más importante, aporta un modelo de estimación del costo del mejoramiento genético y de los invernaderos. En el **Cuadro 7** se muestra un ejemplo resuelto de la hoja principal, con todos los ítemes que componen el costo de la miniestaquilla clonal.

**Cuadro 7.** Modelo de costos para la producción de plantas clonales para reforestación en minijardines clonales hidropónicos.

Precio Unitario (¢)	Descripción
0.20	Selección árboles plus ((4 J. especialista+10 J. Peones / (111 000 plántulas * 10 años))
0.18	Inicio de clonación (corta de árboles (5 visitas/tocón*150 tocones) = 20 tocones/jornal (cosecha y siembra) = 37,5 jornales / 10 años)
0.58	Riego (Vida útil 5 años) para jardín clonal e invernadero
12.63	Compra o alquiler de terreno
14.90	Construcción de invernadero y minitúneles
1.06	Mantenimiento de invernadero y minitúneles + herramientas
1.92	Mantenimiento del minijardín clonal (fertilización, fungicidas, etc)
5.09	Siembra o resiembra del minijardín clonal
3.15	Herramientas y suministros (carretillos, palas, baldes bandejas, etc.), vida útil de 2 años
37.82	Pellets
0.16	Preparado de bandejas (300 bandejas/jornal - Lavado y desinfección, más el costo de la arena)
16.33	Cosecha, preparado y siembra de estacas en bandeja de preenraizamiento (450 estacas/ 1/2jornal) -25% de mortalidad
2.80	Preparación de pellets (hidratación, desinfección, hoyado) 30 bandejas/jornal
14.70	Transplante de bandejas a pellets (500/ 1/2 jornal) 20% plantas de desecho en el transplante
7.26	Rellenado de bandejas (60 bandejas/jornal) 10% plantas desechadas CONTROL DE CALIDAD
0.88	Aclimatación (200 bandejas/jornal - acarreo - riego durante 2 semanas -)
8.24	Embalaje y despacho (Bandejas de 64/ 2.5 minutos por bandeja = 100 bandejas/1 hora = 50000/jornal.
17.64	Vigilancia (2 personas*250 000/mes*12 meses)/producción anual
145.52	Total = Costo Interno de Producción/árbol

Desarrollo de un modelo y una aplicación en EXCEL para planear la producción y estimar el tamaño del invernadero en un sistema de producción clonal forestal a escala comercial

De manera análoga al tema de estimación de costos, como parte del proyecto se desarrolló una aplicación programada en ambiente EXCEL que permite solventar dos temas vitales: 1) planificar la producción de un sistema clonal forestal capaz de cumplir con metas específicas de producción/ventas y 2) estimar el área de invernadero (área de minijardín clonal, área de enraizamiento y área de aclimatación y despacho) requerida para lograr los objetivos de producción definidos previamente.

Esta aplicación está organizada en concordancia con el funcionamiento de un sistema de producción clonal (ver **Cuadro 8**). Su primera hoja es la que permite planificar el tamaño del minijardín clonal capaz de satisfacer una demanda establecida de plantas para reforestación. Esta misma hoja incluye también la organización de las posibles entregas de plantas a los clientes.

La segunda hoja está organizada para estimar el flujo de estaquillas en su fase crítica de enraizamiento y brotación. Permite estimar la cantidad de minitúneles necesarios para satisfacer las demandas de producción y cosecha que viene del minijardín clonal. Finalmente, la última hoja atiende el tema del espacio necesario para aclimatación y despacho.

**Cuadro 8.** Muestra de la salida de la aplicación del programa en ambiente EXCEL, que permite estimar la capacidad de producción del minijardín clonal y el área en ambiente protegido (invernadero) requerido.

Área total en Ambiente Protegido ( m <sup>2</sup> )			TOTAL (m <sup>2</sup> )
Minijardines Clonales	Enraizamiento	Aclimatación	
216	166	176	558
39	30	32	100%

Despacho Total de Plantas	247698
---------------------------	--------

COSTOS DE INVERNADERO	m2	Costo \$/m2	Costo total (US \$)
Minijardines Clonales	216	70	15093
Enraizamiento	166	70	11647
Aclimatación	176	40	7057
	558		33797

#### Sistema de control de calidad para minijardín clonal

El concepto de control de calidad es hoy día fundamental en cualquier actividad económica en el que el humano interviene. Como parte del proyecto, se refinó esta metodología que ya existía, sin embargo, se puso en práctica en varias de las empresas miembro de GENFORES, así como en las actividades de capacitación organizadas como parte del proyecto. En el **Cuadro 9** aparece la hoja de campo utilizada para realizar las labores de muestreo y toma de datos para el control de calidad en minijardines clonales. Como parte de la metodología para el control de calidad, se incluye todos los aspectos de muestreo, que implica dos modalidades a saber: 1) muestreo por parcelas (fajas o bandejas, dependiendo del tamaño de la población) y, 2) muestreo por plantas madre individuales, especial para poblaciones muy pequeñas.

**Cuadro 9.** Formulario utilizado para el control de calidad de minijardines clonales forestales

### Registro para el control de calidad en Minijardines clonales

Fecha de siembra \_\_\_\_\_ Fecha de Evaluación \_\_\_\_\_ Evaluador \_\_\_\_\_  
 Especie/Clon: \_\_\_\_\_ Túnel/Bancal \_\_\_\_\_ Bandeja/Fila en la Bandeja \_\_\_\_\_  
 Presencia de musgos/algas (1 2) \_ Pasillos limpios (1 2) \_ Sombra (1 2) \_ Humedad Relativa (1 2) \_

Planta	h total (mm)	Brotos no cosechados 1 2	Presencia hojas viejas 1 2	Mortalidad 1 2	No. de ejes/brotos productivos	No. de ejes/brotos muertos	Presencia hojas deformes 1 2	Daño Mecánico 1 2	Estado Fitosan.o 1 2 3	Estado nutric. 1 2	Calidad Raíces 1 2 3	Calidad Planta 1 2 3
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

#### Sistema de control de calidad para plantas clonadas que van a plantación comercial

De manera similar al sistema de control de calidad de los minijardines clonales, se optimizó y validó la metodología para el control de calidad de plantas clonadas que irán a plantación. El **Cuadro 10** resume los criterios o variables incluidas en el procedimiento de control de calidad aplicado a los lotes comerciales de plantas clonadas. Como parte del sistema de control de calidad se incluye también los detalles del proceso de muestreo.

**Cuadro 10.** Formulario para el control de calidad de plantas clonadas.

Fecha Cosecha (código): \_\_\_\_\_ Fecha Transplante: \_\_\_\_\_  
 Fecha Medición: \_\_\_\_\_ Especie: \_\_\_\_\_  
 Clon: \_\_\_\_\_ Invernadero \_\_\_\_\_ Mesa/Túnel de producción: \_\_\_\_\_  
 Bandeja No.: \_\_\_\_\_ Fila en Bandeja: \_\_\_\_\_

Estaquilla	h de parte aérea (mm)	No. Hojas nuevas	Hojas Deformes		¿Brotó?		¿Enraizó?		Ejes múltiples 1 2	Daño Mecánico 1 2	Tallo recto 1 2 3	Estado Fitosanitario 1 2 3	Calidad de raíz 1 2 3	Calidad estaquilla 1 2 3
			1	2	1	2	1	2						
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														

#### Objetivo específico 2:

**Mejorar las técnicas de silvicultura clonal intensiva de plantaciones jóvenes de teca y pilón con base en su potencial de crecimiento.**

Dentro de este objetivo se logró la publicación de un primer artículo sobre teca en la Revista Colombia Forestal que se incluye en el apéndice 2 de este informe. Este artículo describe la base de como interpretar apropiadamente el potencial del uso de clones generados a partir de árboles plus versus semilla en plantaciones comerciales.

Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. 2011. *Ganancia genética esperada en teca (Tectona grandis L.) en Córdoba (Colombia)*. Colombia Forestal vol 14(1): 81-93 /enero-junio, 2011.

Un segundo artículo similar fue escrito sobre melina y enviado en el 2012 a la Revista Árvore (Brasil), que sin embargo no ha sido notificada su aceptación.

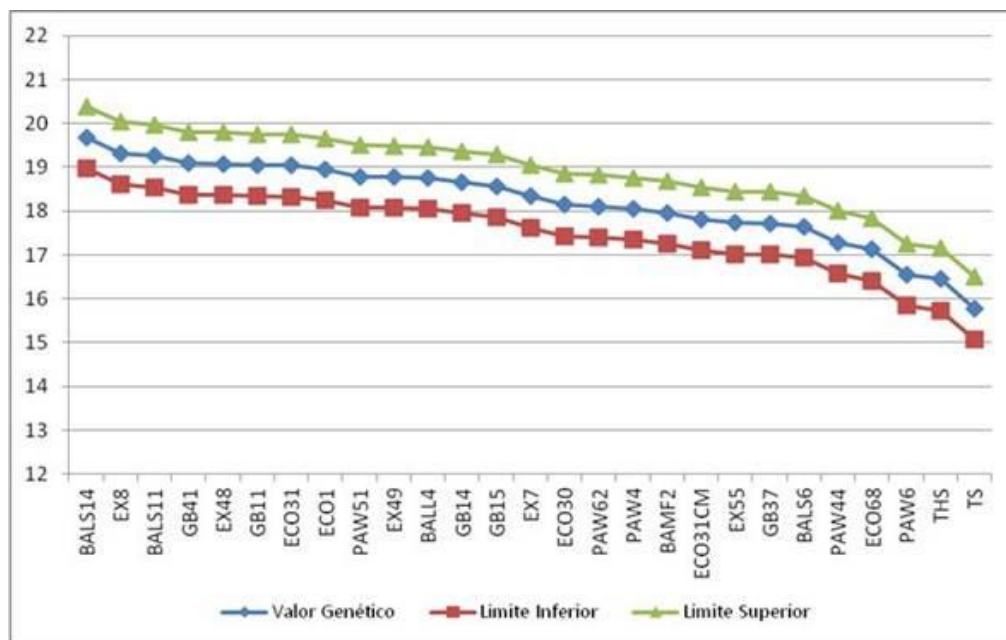
Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. En prensa. *Ganancia genética esperada en melina (Gmelina arborea Roxb.) en Córdoba, (Colombia)*. Árvore.

Ambos artículos se incluyen en el apéndice 2 del informe.

Como parte de los resultados de mayor relevancia del comportamiento juvenil de clones de teca y melina evaluados en varios ensayos genéticos del país, a continuación se muestran las figuras más significativas resultantes de las mediciones y análisis de datos mediante el software SELEGEN. Las mediciones de tres ensayos clonales de pilón, medidos durante el proyecto, no han sido incluidos en este reporte, principalmente por su corta edad (8 y 14 meses) y la poca relevancia de sus resultados, dado el crecimiento más lento de esta especie.

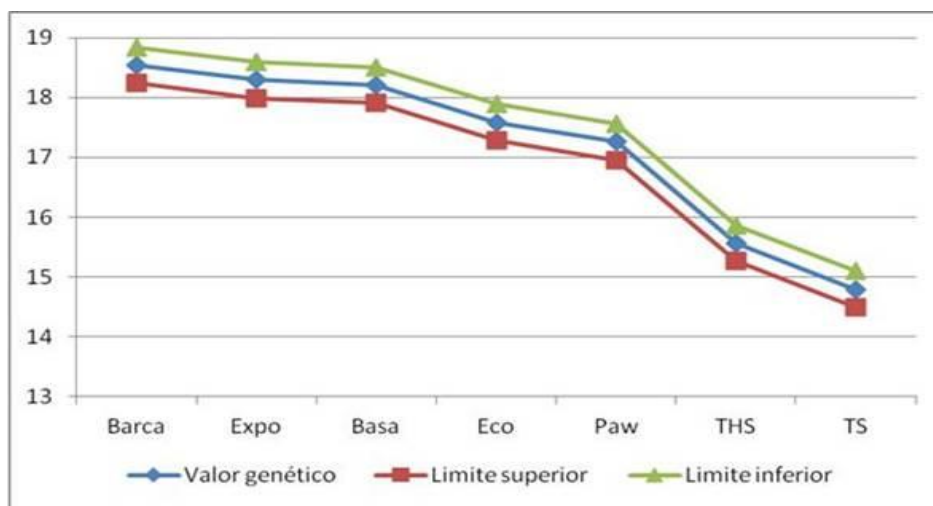
En la **Figura 14** puede claramente observarse las diferencias significativas entre clones de teca procedentes de 5 empresas miembro de GENFORES, donde cada empresa aportó 5 clones de su colección genética. Los resultados muestran grandes diferencias de prácticamente todos los clones con respecto a los dos testigos (THS = semilla de Huerto Semillero de Hojanca y TS = testigo de semilla de los mejores rodales semilleros de Hojanca).





**Figura 14.** Ranking de 25 clones de teca con base en el valor genético del DAP a los 50 meses de edad, en dos ensayos sobre suelos ácidos de la zona norte (El Concho, San Carlos) y la zona sur (Salamá, Osa) de Costa Rica. Ganancia genética para el DAP de un 15%.

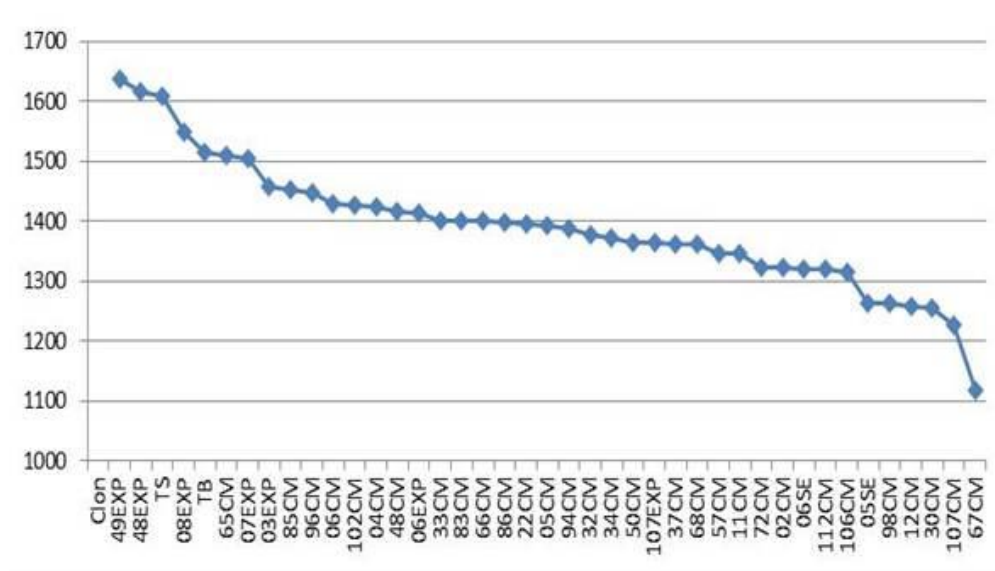
En la **Figura 15** puede observarse diferencias significativas entre el promedio de los clones procedentes de cada una de cinco empresas y dos testigos en los ensayos genéticos repetidos en dos sitios. El valor de cada empresa corresponde al promedio de los valores genéticos individuales de sus cinco clones. Dado que los ensayos están establecidos en sitios con suelos ácidos, precisamente 3 de las 4 empresas cuyas colecciones de clones provienen de suelos ácidos superan a la única empresa participante de Guanacaste con suelos neutrales (PAW, Nandayure, Guanacaste). De manera evidente, todas las empresas superaron a los dos testigos de los ensayos.



**Figura 15.** Ranking de colecciones de clones de teca procedentes de cinco empresas y 2 testigos, con base en el valor genético del DAP a los 50 meses de edad, en tres ensayos sobre suelos

ácidos de la zona norte (El Concho y San Rafael, San Carlos) y la zona sur (Salamá, Osa) de Costa Rica. Ganancia genética para el DAP de un 15%.

En la **Figura 16** se muestran los resultados del ranking clonal (volumen comercial) de un grupo grande de clones de teca, procedentes de la zona norte del país (suelos ácidos de San Carlos y Los Chiles), pero evaluados en Nicoya, Guanacaste. Como resultado interesante, los testigos de la mejor semilla mejorada localmente (Hojancha), superó a la mayoría de los clones procedentes de San Carlos, salvo 3 clones de código EXP. Estos resultados muestran la importancia de validar la adaptabilidad de los clones cuando son llevados lejos de las condiciones donde fueron seleccionados originalmente, fenómeno conocido como interacción genotipo x ambiente. El uso de clones conlleva un riesgo mayor que el del uso de semillas, en particular cuando las condiciones ambientales son marcadamente diferentes en suelos y clima. De manera que es imprescindible un análisis de adaptabilidad antes de su utilización a escala comercial, tal y como lo muestra este valioso ensayo en Pueblo Viejo de Nicoya. Estos clones código EXP muestran su gran capacidad de adaptación y su alto potencial para ser utilizados en distintas regiones del país con bajo riesgo.

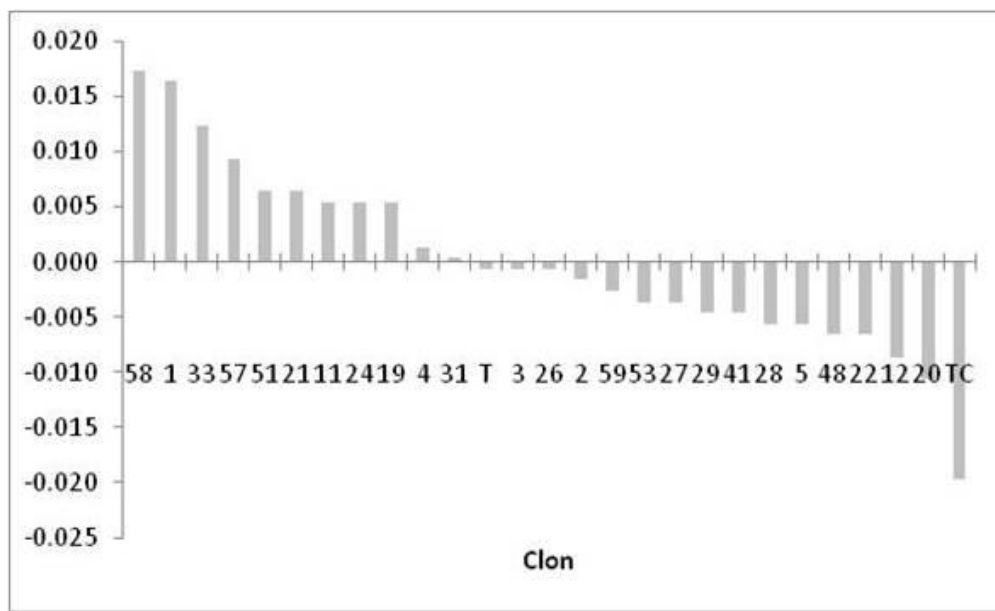


**Figura 16.** Ranking de 32 clones de teca procedentes de la zona norte de Costa Rica, con base en el valor genético de su volumen comercial a los 5 años de edad, evaluados en Pueblo Viejo de Nicoya. La semilla mejorada localmente (Hojancha, TS y TB) compite por los mejores puestos. La escala izquierda no corresponde con las unidades de volumen.

Clon	DAP	Clon	Área de Copa
58	12,72	19	23,57
33	12,66	58	23,03
1	12,55	1	23,00
57	12,38	T	22,93
11	12,28	51	22,26
19	12,14	29	22,20
T	12,02	41	21,95
21	12,01	11	21,91
31	11,96	31	21,86
51	11,93	3	21,82
26	11,91	5	21,74
24	11,84	28	21,72
4	11,77	33	21,63
2	11,75	53	21,55
27	11,70	4	21,31
3	11,69	57	21,09
28	11,63	26	21,09
59	11,61	21	21,04
29	11,54	24	21,02
53	11,53	22	20,96
5	11,39	59	20,89
22	11,32	20	20,56
41	11,23	27	20,48
48	11,15	2	19,71
12	11,00	12	19,56
20	10,99	48	19,20
TC	10,60	TC	19,18
<b>Promedio</b>	<b>11,75</b>		<b>21,38</b>

**Figura 17.** Relación del ranking genético del DAP vs Área de Copa en 25 clones de melina, evaluados a los 18 meses de edad en un suelo ácido en La Alegría de Siquirres, Limón.

La **Figura 17** logra mostrar un nuevo hallazgo de vital importancia para la silvicultura y el mejoramiento genético futuro, cual es la selección de genotipos de copa estrecha. Este tipo de materiales permitirían aumentar el número de pies/ha y la productividad por unidad de área. En este caso se muestra el resultado del ranking genético del DAP y del Área de copa en 25 clones de melina a los 18 meses de edad en Siquirres. Puede entonces observarse que si es posible encontrar genotipos como los clones 33, 57, 21 y 2, que se ubican en las mejores posiciones de crecimiento del DAP, pero en posiciones cercanas a la tabla media e inclusive en la mitad inferior con respecto al ranking del Área de copa. Estos resultados contradicen los postulados teóricos conocidos en silvicultura clásica, que mencionan que a mayor DAP, mayor área de copa o diámetro de copa. El patrón indeseable contrario se observa con el clon 41 con una baja posición en el ranking del DAP, pero entre los clones con la copa de mayor área. Estos resultados evidencian la existencia de genotipos fisiológicamente eficientes, que logran mantener una alta productividad en condiciones marginales o con una menor área foliar, como en este caso. Estos resultados son los primeros de su tipo en nuestro país y muestran una ruta promisoría hacia una silvicultura más intensiva, de mayor productividad, mayor calidad y por tanto, de mayor valor para los productores. Camino que deben seguir países como Costa Rica con poca área disponible y tierra de alto costo.



**Figura 18.** Desvío de cada uno de 25 clones de melina y dos testigos comerciales (T y TC) con respecto al valor promedio del valor genético del volumen comercial a los 18 meses en un ensayo genético en Siquirres, Limón.

Finalmente, la **Figura 18** registra la magnitud de los desvíos del valor genético de los 25 clones de melina con respecto al valor medio de todos los materiales evaluados en el ensayo en Siquirres. Los datos muestran la existencia de grandes diferencias en productividad (volumen comercial) entre los clones evaluados, con valores que más que duplican las diferencias entre clones. Los resultados muestran unos futuros promisorios con el uso de clones de melina debidamente identificados y certificados en la mayor cantidad de sitios posibles.

### **Objetivo específico 3:**

**Determinar caracteres morfológicos de crecimiento temprano y su relación con sus patrones moleculares, como posibilidad de selección de genotipos superiores de las dos especies.**

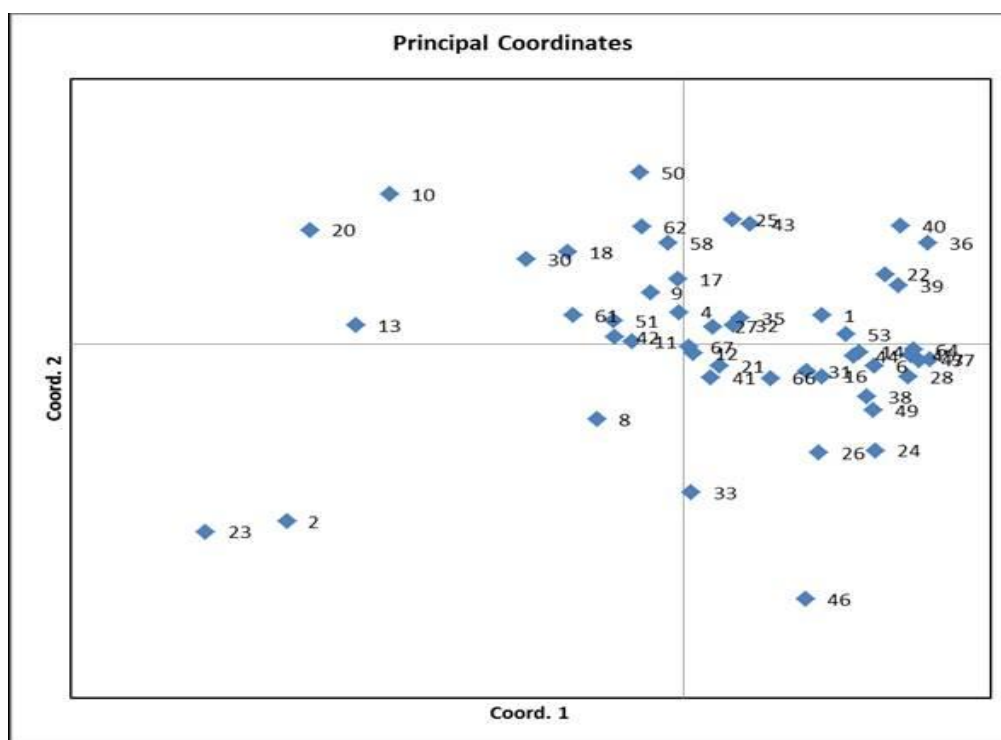
Sobre este capítulo si se logró determinar el genotipo de la mayor parte de los clones de las empresas Panamerican Woods (PAW), Precious Woods y BARCA, así como un primer análisis completo de caracteres de campo vs datos de marcadores moleculares en la colección de PAW a manera de modelo. Se avanzó en el desarrollo de dos publicaciones científicas.

Con el fin de desarrollar un modelo completo de análisis e interpretación de datos de marcadores moleculares vs datos de crecimiento y rendimiento en campo, se priorizó un primer análisis completo con la colección de clones de PAW (50 clones en total). En el **Cuadro 11** se muestra el genotipo de cada uno de los 50 clones para cada uno de los 8 loci (microsatélites SSR) utilizados.

**Cuadro 11.** Genotipos multilocus de los 50 clones del programa de mejoramiento genético de teca de la empresa Panamerican Woods, Costa Rica.

Clon	Locus AC28	Locus AC01	Locus A06	Locus B02	Locus C03	Locus F05	Locus F01	Locus A11								
1	220	248	248	191	191	221	221	313	313	256	256	222	243	269	269	
2	198	220	248	248	186	186	221	221	268	313	256	256	240	240	279	279
4	198	220	248	248	191	191	221	221	263	313	256	256	222	222	279	279
6	220	220	248	248	191	191	213	221	268	313	256	280	222	222	269	269
8	210	210	248	248	191	191	208	221	268	268	256	280	222	222	275	275
9	198	220	213	248	191	191	221	221	268	313	238	256	222	222	279	279
10	198	220	213	248	191	191	221	221	275	313	238	256	233	233	262	275
11	198	220	248	248	180	197	221	221	268	313	238	256	222	222	262	262
12	220	220	248	248	191	191	0	0	268	268	238	256	222	222	275	275
13	198	220	213	248	191	191	221	221	268	268	238	256	233	233	283	283
14	220	220	248	248	178	191	221	221	263	268	238	256	222	222	269	269
16	220	220	248	248	191	191	213	213	268	268	238	256	222	222	262	269
17	220	220	248	248	191	191	221	221	268	313	238	256	222	222	275	275
18	198	220	213	248	191	191	213	213	278	278	238	256	222	222	275	275
20	198	220	213	248	191	191	213	221	256	292	238	256	233	233	275	275
21	220	220	248	248	178	191	221	246	256	313	256	280	222	222	279	279
22	220	220	248	248	191	191	221	221	268	275	238	238	222	222	269	269
23	220	220	248	248	186	186	221	252	268	268	256	280	233	233	275	275
24	220	220	248	248	178	191	221	246	268	268	256	280	222	222	269	269
25	220	220	248	248	191	191	221	221	275	275	238	256	222	222	283	283
26	220	220	248	248	186	191	221	221	268	268	256	256	222	222	269	269
27	220	220	248	248	191	191	221	221	268	268	238	256	222	222	262	262
28	210	220	248	248	191	191	260	260	256	268	238	256	222	222	269	269
30	198	220	213	248	191	191	221	249	268	313	238	238	233	233	262	269
31	198	210	213	248	191	191	213	221	268	313	256	256	222	222	269	269
32	198	220	213	248	191	191	221	221	268	268	238	256	222	222	262	269
33	210	220	248	248	191	191	260	260	268	268	256	280	222	222	279	279
35	198	220	248	248	178	191	221	221	275	313	256	280	222	222	269	275
36	220	220	248	248	191	191	221	246	275	313	238	238	222	222	269	269
37	220	220	248	248	191	191	208	208	268	313	238	256	222	222	269	269
38	198	220	248	248	191	191	213	213	268	268	238	256	222	222	269	269
39	220	220	248	248	191	191	221	249	275	313	238	256	222	222	269	269
40	220	220	248	248	191	191	221	221	275	313	238	238	222	222	269	269
41	220	220	248	248	191	191	221	221	268	268	256	280	222	222	283	283
42	220	220	248	248	191	191	221	221	256	268	256	280	222	233	258	279
43	220	220	248	248	191	191	221	221	275	313	238	256	222	222	258	258
44	220	220	248	248	191	191	221	221	268	268	238	256	222	222	269	269
45	220	220	248	248	191	191	221	252	263	263	256	280	222	222	269	269
46	198	220	248	248	174	186	262	262	268	268	256	280	222	222	269	269
47	198	220	248	248	178	191	208	255	275	313	265	265	222	222	269	269
49	220	220	248	248	191	191	221	249	268	268	256	280	222	222	269	269
50	220	220	248	248	191	191	221	221	259	259	238	238	222	222	275	275
51	220	220	248	248	191	191	221	221	268	268	238	256	222	233	258	258
53	198	220	248	248	178	191	221	221	263	313	256	276	222	222	269	269
58	198	220	248	248	191	191	221	249	275	313	238	256	222	222	275	275
61	198	220	248	248	191	191	221	264	223	245	256	280	222	233	262	262
62	198	220	248	248	191	191	221	221	256	256	222	222	222	222	258	258
64	220	220	248	248	191	191	221	246	223	223	256	256	222	222	269	269
66	220	220	248	248	191	191	221	252	268	268	238	256	222	233	269	269
67	198	220	248	248	191	191	221	221	245	245	256	280	212	212	269	269

La **Figura 19** permite ver como se agrupan los clones de teca según su similitud genotípica (basada en 8 loci o microsatélites), con base en el procedimiento multivariado de coordenadas principales. Con excepción de los clones 23, 2, 20, 13, 46, 10, 33 y 8, los restantes 42 clones registran una alta similitud genética, por tanto, un alto grado probable de parentesco.



**Figura 19:** Agrupación por similitud genética de los 50 genotipos de tecla de la empresa Panamerican Woods (Guanacaste), con base en el genotipo de 8 microsatélites, basado en el procedimiento multivariado de coordenadas principales del software GenAlex.

En el **Cuadro 12** puede apreciarse los valores de varios de los parámetros genéticos de la población de clones de tecla de la empresa PAW. Importante de observar la buena cantidad de alelos por locus (6 en promedio, y varios loci con 10 alelos), pero el número efectivo de alelos es de tan solo 2,2 lo que denota un grado bajo de polimorfismo poblacional. La heterocigosidad observada y esperada fue relativamente similar en los 8 loci investigados, con excepción de los loci B02, F01 y A11, que reflejan un evidente ligamiento y un grado de fijación (F) alto en algunos locus como en el A11.

**Cuadro 12.** Parámetros poblaciones de la colección de clones de tecla de la empresa PAW, Guanacaste.

Locus	N	Na	Ne	I	Ho	He	UHe	F
Locus AC28	50	3,00	1,65	0,69	0,44	0,40	0,40	-0,11
Locus AC01	50	2,00	1,17	0,28	0,16	0,15	0,15	-0,09
Locus A06	50	6,00	1,37	0,61	0,18	0,27	0,27	0,33
Locus B02	49	10,00	2,13	1,29	0,35	0,53	0,54	0,35
Locus C03	50	10,00	3,62	1,66	0,50	0,72	0,73	0,31
Locus F05	50	6,00	2,75	1,19	0,74	0,64	0,64	-0,16
Locus F01	50	5,00	1,48	0,65	0,10	0,32	0,33	0,69
Locus A11	50	6,00	3,41	1,49	0,12	0,71	0,71	0,83
<b>Promedio</b>	50	6,00	2,20	0,98	0,32	0,47	0,47	0,27
<b>Desv. Est.</b>	0,13	1,02	0,34	0,17	0,08	0,08	0,08	0,13

Donde:

**Na = No. de alelos diferentes**

**Ne = No. de alelos efectivos =  $1 / (\text{Sum } \pi^2)$**

**I = Índice de Shannon =  $-1 * \text{Sum } (\pi * \text{Ln } (\pi))$**

**Ho = Heterocigosidad Observada = No. de Heterocigotos / N**

**He = Heterocigosidad Esperada =  $1 - \text{Sum } \pi^2$**

**UHe = Heterocigosidad Esperada No Sesgada =  $(2N / (2N-1)) * He$**

**F = Índice de Fijación =  $(He - Ho) / He = 1 - (Ho / He)$**

Para todos los casos,  $\pi$  = frecuencia alélica.

De manera consistente, el **Cuadro 9** puede observarse que en 7 de los 8 loci investigados en esta colección clonal de teca, no se cumple la ley del equilibrio de Hardy-Weinberg, en concordancia con lo señalado en el **cuadro 8**. Estos resultados reflejan una desviación importante de la heterocigosis observada en relación con la esperada, que se acentúa en aquellos loci con un bajo número de alelos observados (AC28 y AC01).

**Cuadro 13.** Prueba de significancia (Chi –cuadrado) de cumplimiento de la ley del equilibrio de Hardy-Weinberg en los 8 locus investigados de la población clonal de teca de la empresa PAW, Guanacaste.

Locus	GL	ChiCuad	Prob	Signif
Locus AC28	3	10.053	0.018	*
Locus AC01	1	0.378	0.539	ns
Locus A06	15	138.248	0.000	***
Locus B02	45	155.324	0.000	***
Locus C03	45	206.216	0.000	***
Locus F05	15	119.361	0.000	***
Locus F01	10	122.173	0.000	***
Locus A11	15	181.422	0.000	***

**Cuadro 14.** Matriz de correlaciones genéticas entre caracteres medidos en campo (dap, Cal, Bdap, Bcal, etc.) y marcadores genéticos (AC28, AC01, ... A11) en una colección de 50 clones de teca de la empresa Panamerican Woods, Nandayure, Guanacaste.

	dap3	dap4	Cal100	dap4Cal	Bdap3	Bdap4	Bcal100	Bdap4Cal	Cdap3	Cdap4	Ccal100	Cdap4Cal	AC28	AC01	A06	B02	C03	F05	F01	A11	K	
dap3	1																					
dap4	0.87	1																				
Cal100	0.04	0.31	1																			
dap4Cal	0.28	0.55	0.96	1																		
Bdap3	0.98	0.83	0.01	0.25	1																	
Bdap4	0.86	1.00	0.31	0.55	0.82	1																
Bcal100	0.06	0.34	0.99	0.96	0.03	0.34	1															
Bdap4Cal	0.19	0.46	0.98	0.99	0.16	0.47	0.98	1														
Cdap3	-0.92	-0.81	-0.03	-0.25	-0.90	-0.81	-0.05	-0.17	1													
Cdap4	-0.78	-0.91	-0.30	-0.52	-0.73	-0.90	-0.33	-0.43	0.77	1												
Ccal100	-0.03	-0.29	-0.88	-0.86	-0.02	-0.29	-0.87	-0.85	0.01	0.32	1											
Cdap4Cal	-0.31	-0.56	-0.83	-0.88	-0.28	-0.56	-0.84	-0.88	0.29	0.53	0.79	1										
AC28	-0.19	-0.26	-0.09	-0.14	-0.13	-0.27	-0.09	-0.13	0.24	0.27	0.17	0.22	1									
AC01	-0.04	-0.06	0.04	0.01	-0.04	-0.06	0.05	-0.02	0.07	0.12	0.03	0.01	-0.07	1								
A06	-0.08	-0.11	-0.27	-0.28	-0.12	-0.09	-0.28	-0.24	0.09	0.22	0.24	0.27	-0.01	-0.02	1							
B02	0.18	0.18	0.26	0.30	0.20	0.18	0.29	0.26	-0.22	-0.23	-0.25	-0.25	0.12	0.13	-0.33	1						
C03	0.03	-0.01	-0.09	-0.11	-0.02	-0.01	-0.10	-0.09	0.03	-0.03	0.12	0.08	-0.06	-0.08	0.21	-0.24	1					
F05	-0.12	0.04	0.37	0.33	-0.15	0.03	0.37	0.35	0.06	-0.14	-0.31	-0.30	-0.26	0.28	-0.24	0.36	-0.08	1				
F01	0.20	0.11	0.12	0.14	0.23	0.10	0.11	0.12	-0.12	-0.06	-0.15	-0.05	0.10	-0.26	-0.12	0.09	0.11	-0.08	1			
A11	-0.16	-0.05	0.10	0.07	-0.20	-0.05	0.10	0.12	0.19	-0.05	-0.10	-0.18	-0.03	-0.27	-0.16	-0.02	0.13	0.20	0.13	1		
K	-0.12	-0.13	-0.27	-0.27	-0.08	-0.15	-0.25	-0.30	0.16	0.11	0.26	0.24	0.03	0.45	-0.18	-0.19	-0.38	-0.18	-0.19	-0.04	1	

En el **Cuadro 14** se muestra una matriz de correlaciones genéticas entre los dos tipos de caracteres, 1) los generados a partir de los ensayos genéticos en campo y, 2) los obtenidos mediante el genotipo en cada uno de 8 loci investigados mediante la técnica de microsatélites. El objetivo de esta correlación fue tratar de determinar la posible relación entre caracteres pertenecientes a ambos tipos de bases de datos. De manera general, puede observarse que los microsatélites F05 y B02 muestran un valor de correlación alto con la calidad del árbol (Cal). Debe recordarse que los microsatélites son marcadores genéticos neutrales, es decir, no se supone que muestren una correlación directa con ningún rasgo en específico. Sin embargo, si se obtiene una correlación genética de magnitud  $r > 0,3$ , puede estar indicando que el locus que reconoce el microsatélite, debe estar muy cercano (distancia en el cromosoma) a algún rasgo importante en alguno de los cromosomas. Lo que provoca que ambos rasgos segreguen juntos en una tasa muy alta.

Otra información de muy alto valor es la que se muestra en el **Cuadro 15**, donde se indica la agrupación de los 49 clones (genotipos) según su parentesco más probable. Los resultados se obtuvieron mediante el uso del software PEDIGREE 2, que es de carácter público y corre los datos en línea. El procedimiento de agrupación de los genotipos se realiza con base en un procedimiento probabilístico, que asocia los genotipos con su padre y madre más probable. De esta manera, como resultado se obtuvo que los 49 clones de teca analizados de esta empresa, en realidad provengan de 16 familias o árboles madre. La familia que se indica como número 1, dio origen muy probablemente a 10 de los 49 clones, la familia 2 originó a 5 de los clones, luego aparecen varias familias con 4 clones, hasta finalmente señalar que solamente 3 clones provienen de una familia con un solo genotipo. Estos resultados son esperados dado que la selección de estos árboles plus (hoy clonados) se realizó en plantaciones de la empresa, cuyo origen fue muy probablemente de pocos o un solo vivero al momento de su establecimiento. En aquellos años no existían programas de mejoramiento genético en teca (finales de los años 80), por lo que probablemente la semilla que dio origen a las plantas provino de rodales semilleros pequeños y altamente emparentados. Puede también agregarse, que no es casual que un árbol madre de extraordinaria calidad pueda engendrar más de un árbol plus, como sería la explicación más probable en el caso de las primeras familias que aparecen en el **Cuadro 15**. El uso de estas herramientas es de sumo valor en poblaciones de mejoramiento genético, donde antes no era posible estimar el grado de parentesco entre los genotipos que fueron incluidos por selección. Como resultado operativo, la población de mejoramiento genético de esta empresa y probablemente en muchos programas similares, está a un grado mucho mayor de parentesco del que se pensaba. Su base genética es en realidad mucho más estrecha de lo que se pensaba originalmente. Las acciones de introducción de nuevas procedencias y materiales de otras regiones del mundo adquiere por tanto un grado de urgencia mayor para GENFORES.

**Cuadro 15.** Posible origen de 49 clones de teca de la empresa PAW (Nandayure, Guanacaste) de acuerdo con su probable parentesco, basado en su genotipo obtenido a partir de ocho microsatélites.



<b>Familia (Hermanos Completos)</b>	<b>Clones</b>
1	6 14 22 24 26 36 37 40 44 49
2	16 42 43 51 62
3	10 13 20 30
4	2 4 9 21
5	12 17 50 58
6	11 27 32
7	35 47 53
8	23 45 66
9	28 33
10	18 38
11	25 41
12	61 67
13	8 31
14	46
15	64
16	1

**Objetivo específico 4:**

**Capacitar al personal de las empresas reforestadoras en el mejoramiento de los sistemas de producción clonal para mejorar su competitividad y capacidad exportadora.**

Este objetivo logró completarse a plenitud, una buena producción de ponencias en congresos nacionales e internacionales, así como simposios, días de campo, cursos prácticos, dan fe de los resultados y productos alcanzados.

De manera permanente, se visitaron periódicamente a todas y cada una de las empresas miembro de GENFORES durante los 2 años del proyecto. Las empresas radicadas en Costa Rica recibieron al menos 3 ó 4 visitas técnicas de supervisión y capacitación por año. La frecuencia de visitas dependió de la madurez de la empresa en el tema de producción y reforestación clonal. Así por ejemplo, el grupo ASIREA (Guápiles), recibió visitas casi mensuales durante el proyecto debido al cambio de personal sufrido.

La otra modalidad de capacitación se realizó directamente en nuestro invernadero de producción clonal, ubicado en la sede del ITCR en Santa Clara, San Carlos. Como parte del proyecto, nuestro invernadero se mejoró notablemente en todos los aspectos: infraestructura, equipamiento (riego),

mantenimiento, construcción de 5 mini-invernaderos de apoyo a la investigación, reconstrucción de camas de producción, ampliación de la superficie efectiva, etc. **Este proceso permitió que nuestro invernadero se convirtiera en un laboratorio permanente de investigación + innovación + desarrollo en producción clonal forestal.** Se recibió y capacitó al personal técnico de ASIREA (Guápiles), SERAGROFOREST (Ecuador), Norteak (Nicaragua) y a un grupo peruano.

La otra modalidad de capacitación desarrollada fue para las empresas miembro de GENFORES radicadas fuera del país. Se capacitó al personal técnico en su país de las empresas 3F/Kanguroid (Córdoba, Colombia con 4 visitas), Verde Novo (Mato Grosso, Brasil 2 visitas), SERAGROFOREST (Entre Ríos, Ecuador, 2 visitas) y Norteak (Siuna, caribe de Nicaragua, 3 visitas).

**a) Publicación del libro:**

1. Murillo, O.; Espitia, M. y Castillo, C. 2012. Fuentes Semilleras para la Producción Forestal. 1ª ed. Editorial Domar S.A.S. Bogotá, Colombia. 184 p.

Los siguientes capítulos incluyen buena parte de los resultados del proyecto:

Capítulo 6: Propagación de los árboles seleccionados. Págs. 107-124.

Capítulo 7: Viverización de plantas para ensayos de evaluación genética. Págs 125-134.

Capítulo 8: Ensayos genéticos forestales y establecimiento de fuentes semilleras. Págs 135-144

Capitulo 9: Fuentes semilleras: tipos, categorías. Págs 145-168.

**b) Publicación de capítulo de libro sobre teca que incluye los sistemas de propagación clonal**

Capítulo: *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. En: Mitos y realidades sobre las inversiones de teca en América Latina: creando las bases para inversiones sanas. FAO-CATIE. Turrialba, Costa Rica (en edición final).

**c) Desarrollo de tesis de Licenciatura sobre temas directamente relacionados con el proyecto:**

1. Roberto Salas. 2012. Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 54 p.

2. Stephy Solórzano. 2011. Evaluación a los 4 años de edad de variables dasométricas, calidad del fuste y propiedades de la madera en clones de *Tectona grandis* L., Los Chiles, Costa Rica. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 78 p.

3. Luis Manolo Alvarado. 2011. Efecto del espaciamiento y descope en el crecimiento y calidad de plantaciones de *Tectona grandis* en la zona sur de Costa Rica. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 106 p.

4. Pablo Chacón. 2012. Evaluación de ensayos clonales (GENFORES) de *Tectona grandis* en la zona norte y zona sur de Costa Rica. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 93 p.

5. Guald Flores Hurtado. 2012. Comportamiento fisiológico, crecimiento juvenil y potencial de selección temprana en una colección clonal de *Gmelina arborea* Roxb. En la empresa 3F, Córdoba, Colombia. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 92 p.

6. Luis Diego Jiménez. En proceso. Efecto de la variación del fotoperiodo en la productividad de minijardines clonales de teca y melina. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR.

7. Esther Solano Núñez. En proceso. Determinación de síntomas de deficiencias nutricionales en teca y melina utilizando medios hidropónicos. Escuela de Ciencias Ambientales, UNA.

**d) Publicaciones de artículos científicos**

1. Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. 2011. Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.) en Córdoba (Colombia). Colombia Forestal vol 14(1): 81-93 /enero-junio, 2011.
2. Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. En prensa. Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba, (Colombia). Revista Árvore.

**e) Ponencias en congresos nacionales e internacionales:**

1. Murillo, O. 2011. Estrategia de mejoramiento genético para la cooperativa GENFORES. Ponencia magistral. En: XII Congreso Nacional Colombiano de Mejoramiento Genético de Cultivos. Montería, Córdoba, Colombia. 22-24 de junio, 2011.
2. Murillo, O.; Badilla, Y. y Rojas, F. 2011. Calidad de las plantaciones de teca en Costa Rica. En: Conferencia Forestal Internacional: Bosques plantados de teca. Teaknet. 31 octubre al 3 de noviembre, 2011. San José, Costa Rica.
3. Badilla, Y. y Murillo, O. 2011. Avances en el mejoramiento genético de la teca en GENFORES, Costa Rica. En: Conferencia Forestal Internacional: Bosques plantados de teca. Teaknet. 31 octubre al 3 de noviembre, 2011. San José, Costa Rica.
4. Rojas, F. y Murillo, O. 2011. Avance en el uso de marcadores moleculares en la cooperativa de mejoramiento genético forestal GENFORES. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.
5. Badilla, Y. y Murillo, O. 2011. Evaluación del comportamiento de clones de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.
6. Badilla, Y. y Murillo, O. 2011. Estrategia y avances en mejoramiento genético de GENFORES. En: Seminario Fomento del cultivo eficiente de madera, mediante el manejo intensivo. 16-18 noviembre. Sede Universidad Nacional, Paso Canoas, La Cuesta, Puntarenas.
7. Murillo, O. 2011. Cultivo de madera para generar riqueza, empleo y servicios ambientales. En: Seminario socialización de proyectos de investigación forestal, Universidad de Córdoba. 16 de diciembre, 2011. Montería, Córdoba, Colombia.
8. Murillo, O. 2011. Bases para una estrategia de desarrollo forestal en la región Brunca. En: I Congreso Agropecuario, Forestal y del Ambiente de la Región Brunca. 10-12 agosto. San Isidro del General, Pérez Zeledón, Costa Rica.
9. Badilla, Y. y Murillo, O. 2011. Estrategia y avances en mejoramiento genético de GENFORES. En: Seminario Fomento del cultivo eficiente de madera, mediante el manejo intensivo. 16-18 noviembre, 2011. Sede Universidad Nacional, Paso Canoas, La Cuesta, Puntarenas.
10. Murillo, O. y Badilla, Y. 2012. Estado del mejoramiento genético de teca. En: II Simposio OLAT, 12-13 noviembre, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.
11. Badilla, Y. y Murillo, O. 2012. Evolución de los sistemas de propagación clonal de teca. En: II Simposio OLAT, 12-13 noviembre, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.
12. Murillo, O. y Badilla, Y. 2013. Evaluación de la productividad y calidad del sistema de producción clonal comercial *in vivo* de teca en GENFORES. En: IV IUFROLAT. San José, Costa Rica. 12-15 junio, 2013.

**f) Simposios y cursos sobre producción clonal forestal en sede del ITCR en Santa Clara, San Carlos**

1. Avances en silvicultura clonal. 2012. Día de campo. Martes 12 de junio. Presentación de 8 trabajos/avances de investigación. Participación de 40 personas (CR, Nicaragua, Ecuador y Brasil).
2. Curso intensivo sobre control de malezas en plantaciones clonales. Lunes 4 y martes 5 de marzo, 2013. Instructor de Chile y participación de 20 personas (CR y Nicaragua). Sede ITCR en San Carlos.
3. Simposio Internacional sobre Propagación Clonal Forestal. Martes 23 abril 2013. Presentación de 10 trabajos/avances de investigación. Participación de 24 personas (CR, Colombia, Nicaragua, Brasil y Ecuador). Sede ITCR en San Carlos.
4. Curso intensivo, práctico-teórico sobre Producción Clonal Forestal. Miércoles 24 y jueves 25 abril 2013. Presentación de 15 trabajos/avances de investigación. Participación de 22 personas (CR, Nicaragua, Brasil, Colombia y Ecuador). Sede ITCR en San Carlos.

**g) Participación en días de campo**

Como parte importante de la divulgación y capacitación hacia los miembros de GENFORES y el país en general, se participó en varios días de campo y actividades de capacitación organizadas por el CACH (Hojancha, 2 eventos) y por ASIREA (Guácimo y Siquirres, 2 eventos). Estas actividades se realizaron con fines de divulgación de los avances de las organizaciones en producción clonal, reforestación clonal y mejoramiento genético en general.

## Limitaciones y problemas encontrados

- a) Reducción a dos años la propuesta original de proyecto.

El proyecto inició con un importante problema desde sus inicios, ya que fue concebido a 3 años y la VIE obligó a modificarlo a 2, así como a una reducción presupuestaria. Los ciclos de producción forestal se relacionan con el periodo lluvioso y el poder contar con solamente 2 periodos lluviosos, limitó el desarrollo del proyecto desde sus inicios.

- b) Incapacidad por enfermedad de Fabiana Rojas.

A la Ing. Biotecnóloga Fabiana Rojas Parajeles, responsable por el desarrollo del trabajo molecular, se le diagnosticó cáncer de mama desde abril 2012 y se encuentra incapacitada desde entonces. Su sustitución ocurrió en forma parcial (Ing. Dawa Méndez), sin embargo, no se logró una verdadera sustitución funcional en todo el contexto del proyecto. Esto impidió completar el objetivo 3, sin embargo, si se logró genotipar toda la colección de teca investigada en Sta. Clara, así como las colecciones de las empresas PAW, PW y BARCA.

- c) Realización de pasantía en Alemania de 2 meses del investigador principal.

Durante los meses de junio, julio y parte de agosto 2012, Olman Murillo (investigador principal), realizó una pasantía científica en la Universidad de Göttingen, Alemania, que interrumpió buena parte del trabajo del proyecto durante el II semestre del 2012.

- d) Beca de posgrado de la Ing. Yorleny Badilla

La Ing. Yorleny Badilla logró finalmente iniciar estudios de posgrado en la Universidad Federal de Vicosa, Brasil, a partir del II semestre del 2012. Su ausencia ha sido muy sensible y no se logró su total sustitución.

- e) El trabajo sobre uso consuntivo (demanda de agua) del sistema hidropónico de los minijardines clonales, que dirige el Ing. Agrícola Marvin Villalobos, requiere de al menos un periodo lluvioso y otro periodo seco para lograr consolidar una buena base de datos para ajustar modelos. Su incorporación al proyecto ocurrió a finales del II semestre del 2011 y los lisímetros se lograron colocar hasta inicios del 2012.

### **Observaciones generales y recomendaciones**

- a) A pesar de las serias limitaciones de reducción de un año, de incapacidades por salud y ausencia de parte de los investigadores, el proyecto logró un cumplimiento alto de objetivos y productos esperados.
- b) El proyecto permitió darle un buen impulso al sistema de producción clonal de GENFORES, tema que venía relegado por priorización en otros temas como los de evaluación genética de colecciones genéticas. Como uno de sus principales logros está la modernización, mejoramiento y ampliación de las instalaciones del invernadero forestal en la sede del ITCR en Sta. Clara. Tanto así, que en estos momentos esta infraestructura se convirtió en uno de los soportes de GENFORES y en el primer invernadero especializado para la investigación, desarrollo e innovación en silvicultura clonal forestal. En otras palabras, ESTE ES UN NUEVO LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN.
- c) El periodo tan corto para el desarrollo del proyecto (reducción en un año), limitó la generación de información, conocimiento, datos, tesis, etc, pero aún así logró alcanzar un alto cumplimiento de los objetivos específicos. Sin embargo, el periodo corto no permitió la publicación formal de un mayor número de artículos científicos. Por razones estratégicas y de calidad de información, se le dio prioridad a la repetición de la mayoría de los experimentos de producción clonal, con el fin de contar con datos de al menos dos ciclos de producción completos. Información que ya se logró procesar estadísticamente pero que aún está en proceso para su publicación formal. No obstante, la presentación de más de 12 ponencias en congresos científicos internacionales y la realización de 4 eventos (cursos y simposios) internacionales, logró una buena difusión de los principales hallazgos del proyecto y su utilización en las empresas miembro de GENFORES.

## Indicadores de impacto y proyección del proyecto

- a) Hoy día, todos los** miembros de GENFORES que trabajan con teca han reducido en más de un 50% sus necesidades de invernadero y han reducido sus costos de producción clonal en un 33% al cambiar el espaciamiento de sus minijardínes clonales al de 5 x 5 cm (400 plantas madre/m<sup>2</sup>) vs. el sistema anterior de 10 x 5, y a utilizar minijardínes clonales temporales (nuevo sistema en desarrollo y consolidado por el proyecto).
- b)** Las empresas miembro de GENFORES están modificando el sustrato de sus minijardínes clonales hacia una combinación de piedra quinta (33%), arena y carbón, en forma mixta vs. en capas, que está mejorando los problemas fitosanitarios.
- c)** El proyecto generó información adicional para la especie melina en todos los aspectos.
- d)** Nueva información sobre la demanda nutricional de las tres especies ya fue generada y en proceso de finalización su análisis. Con estos datos se podrá diseñar nuevos programas de fertilización para estas especies en sistemas de producción clonal comercial.
- e)** Un nuevo modelo de costos de producción clonal fue desarrollado durante el proyecto y transferido en una aplicación (programa) desarrollado en EXCEL.
- f)** Finalmente y de mayor relevancia, varias de las empresas miembro de GENFORES acordaron constituir un nuevo Consorcio Comercial para la producción clonal a gran escala, motivado en la mayor parte de los hallazgos del proyecto. El ITCR estará representado en este nuevo Consorcio a través de la FUNDATEC. Se espera que en este mismo año 2013 se logre dar inicio a la construcción de un nuevo invernadero a gran escala para intentar abastecer la demanda nacional de clones de alto valor genético de teca y melina a partir del 2014.

## Literatura citada

- Araya, Emanuel, Murillo, Olman, Aguilar, Gabriel, Rocha, Oscar, Woolbright, Scott & Keim, Paul. 2005b. Possibilities of Breeding Teak (*Tectona grandis*) in Costa Rica assisted by AFLP markers. *Kurú* 2(5). Disponible en [www.itcr.ac.cr/revistaKURU/](http://www.itcr.ac.cr/revistaKURU/)
- Araya, Emanuel.; Murillo, Olman; Aguilar, Gabriel. & Rocha, Oscar. 2006. Relaciones genéticas en una colección de clones de *Gmelina arborea* reveladas con marcadores AFLP. *Kurú* 2(6). Disponible en [www.itcr.ac.cr/revistaKURU/](http://www.itcr.ac.cr/revistaKURU/)
- Araya, Emanuel; Murillo, Olman; Gabriel Aguilar and Rocha, Oscar. 2005a. A DNA extraction protocol and initial primers screening in *Hyeronima alchorneoides* for AFLP applications. *Foresta Veracruzana* 7(1): 1-4.
- Arias, Guillermo. 2004. Análisis del impacto económico y social de las plantaciones forestales en Costa Rica. FUNDECOR. San José, Costa Rica. 25 p.
- Badilla, Y.; Murillo, O.; & Obando, G. 2002. Reforestación con especies nativas en la zona norte del país. En: Seminario Nacional sobre Especies Nativas. 3-5 de abril, 2002. Universidad Nacional, INISEFOR. Heredia, Costa Rica.
- Badilla, Y.; Murillo, O. 2011a. Evaluación del comportamiento de clones de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.
- Badilla, Y.; Murillo, O. 2011b. Avances en el mejoramiento genético de la teca en GENFORES, Costa Rica. En: Conferencia Forestal Internacional: Bosques plantados de teca. Teaknet. 31 octubre al 3 de noviembre, 2011. San José, Costa Rica.
- Badilla, Y.; Murillo, O. 2011c. Estrategia y avances en mejoramiento genético de GENFORES. En: Seminario Fomento del cultivo eficiente de madera, mediante el manejo intensivo. 16-18 noviembre, 2011. Sede Universidad Nacional, Paso Canoas, La Cuesta, Puntarenas.
- Badilla, Y.; Murillo, O. 2012. Evolución de los sistemas de propagación clonal de teca. En: II Simposio OLAT, 12-13 noviembre, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.
- Brunner, A.M.; Nilsson, O. 2004. Revisiting tree maturation and floral initiation in the poplar functional genomics era. *The New Phytologist* 164:43-51
- Cannell, M.G.R. y Jackson, J.E. 1985. Trees as crop plants. Institute of Terrestrial Ecology. 592 p.
- Cannell, M.G.R. 1989. Food crop potential of tropical trees. *Expl. Agric.* 25:313-326
- Chacón C., P. 2012. Evaluación de ensayos clonales (GENFORES) de *Tectona grandis* en la zona norte y zona sur de Costa Rica. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 93 p.
- Corley R.H.V. 1983. Potential productivity of tropical perennial crops. *Expl Agric.* 19:217-237.
- Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. 2011. Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.) en Córdoba (Colombia). *Colombia Forestal* vol 14(1): 81-93 /enero-junio, 2011.
- Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. En prensa. Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba, (Colombia). *Revista Árvore* (Brasil).
- Falconer, D.S. 1989. Introduction to quantitative genetics. 3rd Edn. Longman Scientific, London.
- Fournier, L. 1974. Un método cuantitativo para la medición de las características fenológicas en árboles. *Turrialba* 24: 422-423.
- Gifford R.M., Thorne J.H., Hitz W.D., Giaquinta R.T. 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science* 225:801-808
- Glenn, T.C y Schable, N.A. 2005. Isolating Microsatellite DNA Loci. *Methods in enzymology*, VOL. 395.



- Graser, E.A. y Amiro, B.D. 1991. Microclimate and turbulent exchange within Hawaiian shadehouses. In: American Meteorological Society, 20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, Sept. 10-13, Salt Lake City, Utah. p. 46-49.
- Gutiérrez-Soto, M.V., Pacheco, A. y Holbrook, N.M. 2008. Leaf age and the timing of leaf abscission in two tropical dry forest trees. *Trees, Structure and Function* 22:393–401
- Hanson, T.R.; Brunfeld, S.J.; Finnegan, B; Waits, L.P. 2008. Characterization of microsatellite markers for the almendro (*Dypterix panamensis*), atetraploid rainforest tree. *Molecular Ecology Resources* 8: 425-427.
- Jansson, S. y Douglas, C.J. 2007. *Populus*: a model system for plant biology. *Ann. Rev. Plant Biol.* 58:435-458.
- Keiper, F.J.; Hayden, M.J.; Wallwork, H. 2006. Development of sequence tagged microsatellite (STMs) for the barley scald pathogen *Rhynchosporium secalis*. *Molecular Ecology Notes* 6: 543-546.
- Kozlowski, T.T. y Pallardy, S.G. 1997. *Physiology of woody plants*. Academic Press. 411 p.
- Kumar, S. & Garrick D.J. 2001. Genetic response to within family selection using molecular markers in some radiata pine breeding schemes. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 779-785.
- Lande, R & Thompson, R. 1990. Efficiency of marker-assisted selection in the improvement of quantitative traits. *Genetics* 124: 743-756.
- Lowe, A; Goodall-Copestake, W; Caron, H; Kremer, A; Decroocq, S. 2002. A set of polymorphic microsatellites for *Vochysia ferruginea*, a promising tree for land reclamation in the Neotropics. *Molecular Ecology Notes* 2:153-155.
- Marco V. Gutiérrez, Kenneth Jiménez, Dagoberto Soto, Melvin Alpízar, y Cristina Chinchilla. 1999-2002. El microclima en una casa de sombra: Palmas y Zamia como indicadores de aclimatación a la luz. *Rev. Agr. Trop.* 32: 47-60.
- MINA. 2007. Sistema Nacional de Áreas de Conservación. Dirección General. Estrategia para la sostenibilidad de la producción bienes y servicios de bosques y plantaciones forestales en terrenos privados en Costa Rica: 2007-2010. San José, Costa Rica 50 p.
- Moya, Róger; Marín, J.D.; Murillo, O.; Leandro, Laura. 2013. Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control. *Silvae Genetica*.
- Müller, Eva. 1997. Investigaciones en frutos y semillas de árboles individuales de cinco especies forestales de la región Huetar Norte de Costa Rica, con especial consideración en el almacenamiento. Murillo, Olan (traducción del alemán). COSEFORMA. Documento del Proyecto No. 51. San José, Costa Rica. 237 p.
- Murillo, O. & P. Camacho. 1998. Evaluación de la calidad de plantaciones forestales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Serie de Apoyo Académico No. 26. Cartago, Costa Rica. pp.
- Murillo, O.; Badilla, Y. & Gallegos, A. 2003b. Calidad en el Establecimiento de Plantaciones Forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 36 p.
- Murillo, O.; Badilla, Y. & Obando, G. 2002. Posibilidades de reforestación con especies nativas en las zonas altas de Costa Rica. En: Seminario Nacional sobre Especies Nativas. 3-5 de abril, 2002. Universidad Nacional, INISEFOR. Heredia, Costa Rica.
- Murillo, O.; Rojas, J. L. & Badilla, Y. 2003a. 2da edición. Reforestación Clonal. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 36 p.
- Murillo, Olan y Badilla, Yorlenny. 2004. Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51 p.
- Murillo, Olan y Badilla, Yorlenny. 2005. ¿Qué es mejoramiento genético forestal?. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 14 p.

- Murillo, Olman y Fallas, Juan Luis. 2008. Crecimiento efectivo de plantaciones de teca en los primeros cinco años en Costa Rica: una herramienta para el control de calidad. En: II Simposio Internacional Avances en Silvicultura Clonal. 25-26 de noviembre, Heredia, Costa Rica.
- Murillo, O. 2011a. Estrategia de mejoramiento genético para la cooperativa GENFORES. Ponencia magistral. En: XII Congreso Nacional Colombiano de Mejoramiento Genético de Cultivos. Montería, Córdoba, Colombia. 22-24 de junio, 2011.
- Murillo, O. 2011b. Cultivo de madera para generar riqueza, empleo y servicios ambientales. En: Seminario socialización de proyectos de investigación forestal, Universidad de Córdoba. 16 de diciembre, 2011. Montería, Córdoba, Colombia.
- Murillo, O. 2011c. Bases para una estrategia de desarrollo forestal en la región Brunca. En: I Congreso Agropecuario, Forestal y del Ambiente de la Región Brunca. 10-12 agosto. San Isidro del General, Pérez Zeledón, Costa Rica.
- Murillo, O.; Badilla, Y.; Rojas, F. 2011. Calidad de las plantaciones de teca en Costa Rica. En: Conferencia Forestal Internacional: Bosques plantados de teca. Teaknet. 31 octubre al 3 de noviembre, 2011. San José, Costa Rica.
- Murillo, O. et al. 2012 (en prensa). Teak in Latin America: Genetic aspects. (Capítulo de libro CATIE/FAO Teca en América Latina).
- Murillo, O., Badilla, Y. 2012. Estado del mejoramiento genético de teca. En: II Simposio OLAT, 12-13 noviembre, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.
- Murillo, O.; Badilla, Y. 2013. Evaluación de la productividad y calidad del sistema de producción clonal comercial *in vivo* de teca en GENFORES. En: IV IUFROLAT. San José, Costa Rica. 12-15 junio, 2013.
- Murillo, O.; Espitia, M.; Castillo, C. 2012. Fuentes Semilleras para la Producción Forestal. 1ª ed. Editorial Domar S.A.S. Bogotá, Colombia. 175 p.
- Murillo, O.; Guevara, V. 2013. Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO, San José, Costa Rica. 159 pp.
- Namkoong, G., Kan H.C., Brouard, J.S. 1988. Tree breeding: principles and strategies. Springer Verlag, Berlin.
- Oficina Nacional Forestal. 2007. Situación del sector forestal costarricense. San José, Costa Rica. 16 p.
- Pavlotzky, B.; Murillo, O. 2012. Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en Los Chiles, Costa Rica. Agronomía Mesoamericana 23 (1): 1-13.
- Resende, Marcos Deón, v. de. 2002. Genética Biométrica e Estatística no Melhoramento de Plantas Perenes. EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, Brasil. 975 p.
- Rojas, F.; Murillo, O. 2011. Avance en el uso de marcadores moleculares en la cooperativa de mejoramiento genético forestal GENFORES. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.
- Resende, M.D. V. de, 2006. O Software Selegen-Reml/Blup. EMBRAPA. Campo Grande, Brasil. 299p.
- Resende, M.D. V. de, 2007. SELEGEN-REML/BLUP: Sistema Estatístico e Seleção Genética Computadorizada. EMBRAPA. Brasília, Brasil.

- Rojas F, Murillo O, Araya E, Aguilar G; Rocha O. 2007. VALIDACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LA TÉCNICA DE MICROSATÉLITES PARA EL ANÁLISIS GENÉTICO DE *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. Foresta Veracruzana 9(1):9-15. (2007).
- Rojas, F.; Murillo, O. 2011. Avance en el uso de marcadores moleculares en la cooperativa de mejoramiento genético forestal GENFORES. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.
- Rojas, F., Murillo, O.; Aguilar, G.; Rocha, O. y Araya, E. 2011. Análisis genotípico en *Vochysia guatemalensis* Donn Smith (*Vochysiaceae*) mediante microsatélites. Revista Forestal Mesoamericana Vol 8 (20): 9-19.
- Rojas, K., Holbrook, N.M.; Gutiérrez-Soto, M.V. 2007. Dry-season leaf flushing of *Enterolobium cyclocarpum* (ear-pod tree): above- and below-ground phenology and water relations. Tree Physiology 12:1561-1568.
- Salas, R. 2012. Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 54 p.
- Solórzano, S., Moya, R., Murillo, O., 2012. Early prediction of basic density, shrinking, presence of growth stress, and dynamic elastic modulus based on the morphological tree parameters of *Tectona grandis*. Journal of Wood Science. Published online: 24 april 2012.
- Verhaegen, D; Ofori, D; Fofana, I; Poitel, M; Vaillant, A. 2005. Development and characterization of microsatellite markers in *Tectona grandis* (Linn.f). Molecular Ecology Notes. 5: 945-947.
- Vos, P.; Hogers, R.; Bleeker, M.; Reijans, M.; van de Lee, T.; Hornes, M.; Frijters, A.; Pot, J.; Peleman, J.; Kuiper, M y Zabeau, M. 1995. AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. Nucleic Acids Research 23 (21): 4407-4414.
- WAGONNER, P.E.; PACK, A.B.; REIFSNYDER, W.E. 1959. The climate of shade; a tobacco tent and a forest stand compared to open fields. New Haven. Connecticut Agricultural Experiment Station. Bulletin 626. 39 p.
- WOLFF, X.Y.; COLTMAN, R.R. 1989. Productivity under shade in Hawaii of five crops grown as vegetables in the tropics. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 115:175-181.
- Wu, R., Bradshaw D. Jr., & Stettler R.F. 1998. Developmental quantitative genetics of growth in *Populus*. Theoretical and applied Genetics 97: 1110-1119.
- Zane, I; Bargelloni, L; Patarnello, T; 2002. Strategies for microsatellite isolation: a review. Molecular Ecology 11. Pp: 1-16.

## **Apéndice 1**

Artículo científico publicado en revista indexada

Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C. 2011. Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.) en Córdoba (Colombia). Colombia Forestal vol 14(1): 81-93 /enero-junio, 2011.

## **GANANCIA GENÉTICA ESPERADA EN TECA (*Tectona grandis* L.) EN CÓRDOBA (COLOMBIA)**

### **EXPECTED GENETIC GAIN IN TEAK (*Tectona grandis* L.) IN CORDOBA (COLOMBIA)**

Titulo corto sugerido: **Ganancia genética esperada en teca**

#### **RESUMEN**

El departamento de Córdoba (Colombia) programó plantar 200.000ha forestales para el 2025. La teca se priorizó por su adaptación, calidad de madera y valor en los mercados asiáticos. El objetivo del estudio fue estimar la ganancia genética esperada, en la selección fenotípica de árboles plus en 5.316ha comerciales de teca en Córdoba, para el diámetro a la altura del pecho, altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste. La selección se basó en la evaluación fenotípica del árbol candidato y sus cuatro mejores vecinos en un radio de 20m, calificando individualmente la calidad de las primeras cuatro trozas de 2,5m de largo. Los árboles seleccionados se clasificaron en lista A cuando superaron en volumen y calidad, en el diferencial de selección a sus cuatro mejores vecinos, y en lista B, los árboles superiores solamente en volumen ó calidad. La ganancia genética se estimó mediante el producto del diferencial de selección X heredabilidad en sentido estricto promedio reportada. Se construyó un índice de selección que integró de forma ponderada el volumen (60%) con la calidad (40%). De 46 árboles seleccionados, 18 fueron clasificados como plus A. Al seleccionar y clonar los 18 mejores árboles A, se esperan ganancias genéticas de 5,52%; 17,50%; 41,71% y 9,59%, para el diámetro, altura, volumen y calidad del fuste, respectivamente. Los resultados sugieren un progreso genético importante de la teca en Córdoba, siempre y cuando se amplíe la base genética del programa y se compruebe los resultados mediante ensayos genéticos en varias zonas productoras potenciales.

Palabras clave: Teca, Árboles plus, diferencial de selección, volumen comercial, calidad, índice de selección.

#### **ABSTRACT**

Córdoba department (Colombia) has programmed to establish 200.000ha of forest plantations by year 2025. The teak was prioritized by its adaptation, wood quality and value in asian markets. The objective of present investigation was to estimate expected genetic gain, on the teak plus trees phenotypically selected in 5316ha planted Córdoba's department, for diameter at breast height, commercial height, commercial volume and log quality traits. The selection was based on phenotypical evaluation of candidate tree and its four best neighbors within a radius of 20m, qualifying individually the first four segments of 2,5m length. The selected trees were classified in list A as determined to be superior in both, volume and quality, according to the selection differential to all its four best neighbors. List B included those plus trees found superior only in commercial volume or in stem quality. Genetic gain was estimated by multiplying selection differential X average narrow sense heritability. We estimated a Selection Index that integrate commercial volume (60%) and stem quality (40%). From 46 selected trees, 18 were classified as plus A. In selecting and cloning the 18 best A plus trees, based on Selection Index, we expected genetic gains of 5,52% (diameter); 17,50% (height); 41,71% (commercial volume) and 9,59% (stem quality). These results suggest an important genetic progress breeding teak in Cordoba, as long as they broaden the genetic base of the program and verify results with genetic testing in various potential production areas.

Key words: Teak, Plus trees, selection differential, commercial volume, quality, selection index.

## INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con 25 millones de hectáreas aproximadamente, con aptitud forestal, de las cuales el departamento de Córdoba posee 897.086ha (CONIF, 2003; MADR, 2005; Rincón, 2009). En Córdoba existen 15.000ha de plantaciones forestales (nativas e introducidas) y en los próximos 25 años se espera plantar 200.000ha en las principales zonas productoras (CFC, 2000; CONIF, 2003). Entre las especies introducidas plantadas para la producción de madera con fines comerciales, en orden de mayor participación, se encuentran teca (*Tectona grandis* L.), acacia (*Acacia mangium* Willd.) y melina (*Gmelina arborea* Roxb.), con un 25,8%, 24,9% y 5% del área plantada, respectivamente. En ese mismo orden, son las que proveen la mayor cantidad de madera de alta calidad para abastecer la demanda en el mercado internacional (Rincón, 2009).

La teca es una especie latifoliada que pertenece a la familia Verbenaceae (Fonseca, 2004), con una distribución natural discontinua. Muchos autores citan que la especie es originaria del sureste asiático, principalmente de Burma o Birmania, ahora Myanmar, Tailandia, la India, Malasia, Java, Indochina y la República Democrática Popular de Laos, entre los 12 y 25° latitud norte y de 73 a 104° longitud este. En la zona de distribución natural, los bosques son de tipo monzónico, desde bosque seco tropical hasta bosque húmedo tropical.

La teca es un árbol de fuste recto, con dominancia apical y puede alcanzar más de 50m de altura y 2m de diámetro en su lugar de origen. En Costa Rica y en Colombia alcanza alturas superiores a los 35m en los mejores sitios. Crece desde 0 a 1000 msnm y se adapta a gran variedad de suelos, pero prefiere suelos planos, aluviales, de texturas franco-arenosas o arcillosas, profundos, fértiles, bien drenadas y con pH neutro o básicos. Las plantaciones de teca mejoran la calidad de los sitios, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Fonseca, 2004).

La madera de teca por su solidez, resistencia, trabajabilidad, calidades estéticas y variedad de uso, es la madera tropical con mayor demanda y valor de sus productos en el mercado internacional de maderas (Trujillo, 2009; Ladrach, 2010). En Córdoba, se siembra hace más de 40 años y está reconocida como una especie potencial para ser utilizada en proyectos de reforestación comercial (CONIF, 1998).

La actividad forestal ha aumentado significativamente como consecuencia de la escasez de madera del bosque natural y la creciente demanda de productos forestales por parte de la población. Sin embargo, 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 (Murillo & Badilla, 2004).

El desarrollo de las tecnologías de propagación *in vivo* han permitido grandes progresos en el cultivo de eucaliptos en el mundo (Xavier *et al.* 2009), donde la productividad avanzó de 200m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en los años 70's, hasta superar actualmente la barrera de los 400m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a nivel operativo, con resultados de investigación que superan los 500m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en 7 años. Estos resultados son el producto de la visión de las plantaciones como un cultivo, donde confluyen tres componentes vitales: Suelo + Semilla + Manejo (Murillo & Badilla, 2005).

Los principales problemas para la producción forestal en el país y en el departamento de Córdoba, específicamente con *T. grandis*, radican en: a) bajo rendimiento, b) escasez de semilla (sexual o asexual) como material base para atender la demanda de siembra, c) dificultad para importar semilla (sexual o asexual) mejorada para siembra, d) como parte de la ausencia de un programa de mejoramiento genético en la región (CFC, 2000).

El éxito de un programa de mejoramiento genético depende de la calidad e intensidad de selección (rigor) de los árboles parentales. Las ganancias esperadas dependen tanto del control genético de las características de interés como de la variabilidad existente en la población (Zobel & Talbert, 1988; Balcorta & Vargas, 2004). La heredabilidad en sentido estricto y el diferencial de selección son útiles para predecir la respuesta de la selección en especies forestales (Zobel & Talbert, 1988). El diferencial de selección es importante, porque está altamente correlacionado con la ganancia genética, que es el fin de un programa de mejoramiento genético (Balcorta & Vargas, 2004).

De manera general, se ha utilizado el diferencial de selección fenotípico obtenido durante la selección de los árboles plus, como base para estimar el progreso genético esperado en teca (Vallejos *et al.* 2010). Las estimaciones de ganancia genética esperada le permiten al mejorador forestal conocer su progreso genético potencial y decidir al inicio del programa, cuáles individuos componen la población comercial y cuáles la población de mejoramiento (Vallejos *et al.* 2010).

Existen diversos reportes de varios países sobre intensidad de selección y ganancia genética para varios caracteres de interés del árbol en diferentes especies forestales (Botrel *et al.* 2007; SangUrk *et al.* 2007; Blada & Popescu, 2008; Oh *et al.* 2008; Rocha *et al.* 2009; Verryrn *et al.* 2009; Vallejos *et al.* 2010). En Colombia se han reportado ganancias genéticas esperada, para caracteres como el DAP, altura total y forma del fuste en varias especies nativas: *Alnus jorullensis*; *Cariniana pyriformis*; *Cordia alliodora*; *Genipa americana* y *Tabebuia rosea* (Rodríguez & Nieto, 1999), pero no se encontraron artículos que referencian a *T. grandis*.

El objetivo de este trabajo fue estimar la ganancia genética esperada, con base en la selección fenotípica de los mejores 46 árboles plus seleccionados en 5.316 ha de teca de plantaciones comerciales del departamento de Córdoba, como parte del desarrollo de un programa de mejoramiento genético con esta especie en Córdoba (Colombia).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó durante los años 2008 y 2009, en seis plantaciones comerciales de teca (*T. grandis* L.) del departamento de Córdoba (Colombia), de ocho a más de 20 años de edad, las cuales sumaron un total de 5.316 hectáreas (Tabla 1).

El proceso de selección de los árboles plus se realizó mediante visita y participación de trabajadores de las plantaciones, utilizando la metodología propuesta por Zobel & Talbert (1984) y adaptada por Vallejos *et al.* (2010). Donde se diferencian los árboles plus en categoría A si superan claramente a todos y cada uno de sus mejores vecinos inmediatos (comparadores), en todos los caracteres evaluados. Mientras que la categoría B se define para aquellos candidatos a plus, que no logren registrar su superioridad hacia alguno de sus mejores vecinos, o en alguno de los caracteres de selección evaluados. Se asume así, que los árboles de la categoría B formarán también parte de la población de mejoramiento pero no de la población comercial, hasta tanto los ensayos genéticos de comprobación determinen su permanencia y estatus dentro del programa.

La selección de los árboles ocurrió en dos fases, a) preselección de los mejores candidatos de toda la plantación, y b) sanción o verificación de la superioridad fenotípica de los candidatos preseleccionados. La primera fase del procedimiento se basa en una revisión exhaustiva de toda el área plantada, buscando los fenotipos sobresalientes en altura total, altura comercial, calidad del fuste y volumen. Por tanto, esta preselección implica una primera estimación de la intensidad de selección “*i*”, que consiste en la relación de los elegidos vs la población total original de individuos de la plantación. La segunda fase de selección, revisa las características del candidato y se compara contra los mejores 4 vecinos en un radio de aproximadamente 20 m, tal y como se explica en detalle más adelante. Los candidatos que logran superar la fase de verificación se constituyen en árboles plus, que constituyen entonces la población base de mejoramiento. Su número es utilizado entonces como estimador de la intensidad de selección “*i*” de la población original que dio origen a la plantación.

Todos los árboles pre-seleccionados y sancionados en cada lote fueron identificados y georeferenciados, para poder coleccionar su semilla posteriormente. La selección se basó en la evaluación fenotípica del árbol candidato y sus cuatro mejores vecinos en un radio de 20m, considerando los siguientes caracteres deseables: a) árbol sin gambas, b) fuste rectilíneo, c) pocos nudos, d) copa del árbol pequeña y simétrica, e) ramas delgadas con ángulo de inserción de 45 a 90°, f) dominante en altura, g) sanidad del árbol, h) diámetro a la altura del pecho (DAP), i) altura comercial ( $h_{COM}$ ) y j) calidad del fuste (CALI); calificando en forma individual las primeros cuatro trozas de 2,5 m de largo basado en una escala de “1” a “4”, donde un valor de “1” es la mejor calidad posible y un valor de “4” se asigna para trozas sin valor como madera sólida (Murillo & Badilla, 2004).

El volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ) se estimó utilizando la fórmula de conicidad que incorpora el DAP y la  $h_{COM}$ , así:  $Vol_{COM} = [(DAP/100)^2 * 0,7854 * h_{COM} * 0,70]$ . La CALI del árbol se estimó con el promedio ponderado de la calidad individual de sus primeros cuatro trozas comerciales. El peso ponderado de la troza en el fuste se basó en su aporte al volumen total de los primeros 10 metros de fuste (Murillo & Badilla, 2004):

- Troza 1 = 40% (0 a 2,5m)
- Troza 2 = 30% (2,51 a 5m)
- Troza 3 = 20% (5,01 a 7,5m)
- Troza 4 = 10% (7,51 a 10m)

El valor de calidad del árbol (CALI) se convierte en una variable cuantitativa que registra valores de “1” a “4”.

Los árboles seleccionados se clasificaron en dos listas A y B. En la lista A, se incluyen los árboles que registraron superioridad tanto en  $Vol_{COM}$  como en CALI, con base en el diferencial de selección:  $S = [(Y_{\text{árbol seleccionado}} - \bar{Y}_{\text{árboles vecinos}}) / \bar{Y}_{\text{árboles vecinos}}] * 100$  y en la lista B, cuando superaron solamente en  $Vol_{COM}$  ó en CALI a todos sus mejores vecinos. La CALI se transformó de la escala original de “1” a “4” a una escala de 1 a 100 para facilitar su comprensión e interpretación, así:  $CALI_{\text{Invertida}} = 100 * \{1 - [(CALI - 1) / 3]\}$ . Con los valores obtenidos de S, se estimó el diferencial de selección promedio por: i) lote o plantación, ii) todos los árboles seleccionados y iii) árboles seleccionados en la lista A (Zobel & Talbert, 1984; Vallejos *et al.*, 2010).

La ganancia genética (GG) se estimó a través de la siguiente ecuación (Zobel & Talbert, 1984; Murillo *et al.*, 2004; Cruz, 2005; Vallejos *et al.*, 2010):

$$GG = S * h^2$$

Donde: “S” es el diferencial de selección y  $h^2$  es la heredabilidad en sentido estricto promedio reportada para un grupo amplio de especies tropicales:  $h^2_{\text{Diámetro}} = 0,20$ ;  $h^2_{\text{Altura}} = 0,25$ ;  $h^2_{\text{Volumen}} = 0,25$  y  $h^2_{\text{Calidad}} = 0,35$  (Cornelius, 1994).

Con la GG obtenida, se construyó un Índice de Selección (IS) que integró de forma ponderada el  $Vol_{COM}$  con la CALI, así (Murillo *et al.*, 2004; Vallejos *et al.*, 2010):

$$IS = [(0,6 * Vol_{COM} / ds) + (0,4 * CALI / ds)]$$

En donde “ds” es la desviación estándar de cada carácter.

Con base en el “IS” se obtuvieron los mejores árboles plus seleccionados, los cuales pueden constituir la población comercial (plus A) y el resto de los árboles (plus B) forman parte únicamente de la población de mejoramiento e investigación. Todos los cálculos en este estudio se realizaron en la hoja electrónica de Excel.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Árboles plus seleccionados e intensidad de selección.** En la Tabla 2, se puede observar que el proceso de selección realizado en las 5.316 hectáreas muestreadas, permitió identificar un total de 46 árboles plus por sus características fenotípicas sobresalientes. Sólo cuatro plantaciones de seis muestreadas permitieron identificar árboles superiores. El número de árboles seleccionados por lote osciló entre 1 y 21. Esta variación se debe fundamentalmente a la variación en tamaño de las plantaciones, las cuales oscilaron entre 6 y 2.700 hectáreas (Tabla 1). Otro factor que pudo afectar el número de árboles seleccionados por lote, puede ser la variabilidad y el origen genético de la semilla sexual (semilla de áreas productoras de semilla de libre polinización, según información de la administración de las plantaciones) utilizado para la siembra de las plantaciones objeto de estudio, lo cual se pudo detectar en la visita de selección y eliminación de árboles en las plantaciones, hasta el punto que en dos de ellas (Palma Vino y Santa Elena) no se incluyó ningún árbol superior.

Con base en el proceso de selección anterior, se obtuvo una intensidad de selección por lote que osciló entre 1 por cada 2.200 (Santo Tomás) a 1 por cada 48.333 árboles (Hacienda el Páramo). Esto originó una intensidad de selección promedio de 1 árbol seleccionado por cada 36.193 árboles evaluados (Tabla 2), que equivale aproximadamente a 1 árbol por cada 30,5 ha. Esta intensidad de selección promedio resultó ser mayor, que la reportada por Vallejos *et al.* (2010) en GENFORES (Costa Rica) de 1 árbol plus por cada 15.000 a 20.000 individuos, lo cual demuestra el rigor y exigencia en el proceso de selección de los mejores árboles en las plantaciones revisadas en Córdoba.

De los 46 árboles seleccionados, el 39%, aproximadamente (18 árboles), superó a sus mejores vecinos en los dos criterios, volumen y calidad (Plus A). Mientras que el 61% restante de los árboles seleccionados (28), sólo superaron a sus árboles vecinos en volumen o en calidad (Plus B). La intensidad de selección para los 18 árboles plus A, fue de 1 cada 92.493 árboles. Esta intensidad de selección promedio para este grupo de árboles, resultó ser más exigente que la reportada por Balcorta & Vargas (2004), Murillo & Badilla (2009) y Espitia *et al.* (2010), quienes reportan intensidades de 1 un árbol plus por cada 1.111 individuos; 1 árbol por cada 15.000 a 20.000 individuos y 1 árbol plus por cada 10.622 a 30.538 individuos, respectivamente. Igualmente, nuestras intensidades de selección fueron superiores a las recomendadas por Zobel & Talbert (1984), quienes sugieren intensidades de selección de 1: < 20 para rodales semilleros y 1:



> 1 000 para huertos semilleros. Los valores de intensidad de selección obtenidos en este estudio, se consideran suficientes para el comienzo de un programa de mejoramiento genético, ya que además de permitir identificar un número importante de árboles superiores, también hace posible racionalizar y hacer eficiente el proceso de mejoramiento, sin generar problemas importantes de endogamia en la progenie resultante.

**Diferencial de selección, ganancia genética esperada e índice de selección.** En la Tabla 3 se observa que el diferencial de selección promedio (%) varió con el tipo de lote y los cuatro caracteres evaluados. Aún cuando el número de árboles seleccionado en cada lote fue diferente, el lote que permitió lograr los mayores diferenciales de selección en volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ) fue Refopal (90,47%). Mientras que el mayor diferencial de selección en calidad del fuste (CALI), se registró en Reforestadora del Caribe (25,25%), seguido por el Páramo (24,23%) y Refopal (23,51%). Entre los cuatro caracteres, el mayor diferencial de selección fue registrado en el volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ), seguido por la altura comercial ( $h_{COM}$ ), calidad del fuste (CALI) y diámetro a la altura del pecho (DAP), con valores promedios de 88,99; 55,00; 23,70 y 10,32%, respectivamente. Estos resultados son similares en tendencia y magnitud a los encontrados en *Acacia mangium* por Espitia *et al.* (2010), e igualmente, son superiores a los reportados en melina por Kumar & Matharoo (2003) y Balcorta & Vargas (2004), quienes reportaron valores de diferencial de selección de 40% para altura total y 40% para volumen comercial respectivamente.

A pesar de lo anterior, se debe tener presente como lo señalan Vallejos *et al.* (2010), que estos valores de diferencial de selección son por lo general más bajos de lo real, debido a que cada árbol plus fue evaluado contra sus mejores cuatro vecinos. Se puede pensar que estos vecinos son competidores muy fuertes, y por tanto, parte de los mejores individuos de la población base ordinaria (sin mejoramiento) que usualmente se obtiene de los viveros comerciales. Por lo tanto, el verdadero diferencial de selección que se presenta en este tipo de programas, usualmente es superior y supera significativamente a la población base.

La misma tendencia en el diferencial de selección, se puede observar en los cuatro caracteres evaluados, cuando sólo se consideran los 18 árboles plus A. Los valores más altos se registraron en:  $Vol_{COM}$  (139,02%),  $h_{COM}$  (58,33%), CALI (23,98%) y DAP (22,07). Estos resultados reflejan una superioridad genética potencial de los 18 árboles plus A frente a los 46 seleccionados (A+B), especialmente en  $Vol_{COM}$  (50,03 puntos más en porcentaje) y DAP (11,75 puntos más en porcentaje). Los valores de diferencial de selección registrados en este estudio, son similares en tendencia y magnitud a los encontrados en *A. mangium* por Espitia *et al.* (2010), y mayores a los reportados por: Vallejos *et al.* (2010) en teca de 22,88% en volumen y 21,83% en calidad; igualmente a los encontrados por Murillo & Badilla (2003) en teca, con diferencial de selección para el volumen comercial de 24% superior en las mejores familias y de 39% más que los testigos. Así mismo a los valores relacionados por Balcorta & Vargas (2004), quienes han registrado diferenciales de selección de un 40% para altura y 40% para volumen comercial respectivamente, con respecto a la población original.

Se destacan dos resultados importantes del proceso de selección: 1) los mayores índices de selección (IS) se presentaron en la plantación de Reforestadora del Caribe (IS= 49,45) y el Paramo (IS= 36,90), ubicadas en el municipio de Puerto Libertador y Canalete, respectivamente (Tabla 3). Estos resultados evidencian que en estas poblaciones se encuentra la mayor cantidad de árboles seleccionados, que reúnen las mejores características en crecimiento, volumen y calidad del fuste; 2) Existe superioridad en el índice de selección de los 18 árboles plus A (IS= 37,90) sobre los 46 árboles seleccionados (IS= 34,82), esto se explica porque los individuos plus A, superan en volumen y calidad a los mejores vecinos o testigos.

El diferencial de selección para la calidad de las primeros cinco trozas (de 2,5m de largo cada una) presentado en la Tabla 4, indica que los árboles plus A superaron a sus mejores vecinos entre 1,46% (primera troza: altura de 2,5 m) y 92% (cuarta troza: altura de 10 m). La anterior ventaja considerando el peso económico de cada troza en porcentaje, se traduce en una diferencia total de 39,37% en calidad a favor de los árboles plus A en comparación con sus mejores vecinos. Se deduce igualmente, que los árboles plus A y A+B registran no solo una mucha mayor altura comercial promedio (12,5m ó cinco trozas por árbol) en relación con sus mejores vecinos (8,20 m ó tres trozas productivas por árbol), sino también una mucha mejor calidad. Lo cual representa un alto impacto en el potencial industrial al seleccionar y utilizar (vía clonación) estos árboles superiores en un programa de reforestación comercial.

Al comparar los valores promedios de los 18 árboles plus A, los 46 árboles seleccionados (A+B) frente al grupo de 184 mejores vecinos utilizados como testigos (Tabla 5), se puede detectar un incremento de los árboles plus A de 58,33% y 23,98%, en altura comercial ( $h_{COM}$ ) y calidad del fuste (CALI), respectivamente, frente a los testigos.

En la Tabla 6 se presentan los resultados en diferencial de selección (S), ganancia genética esperada (GG) e índice de selección (IS) en los cuatro caracteres estudiados, con los 46 árboles plus seleccionados (A+B) y los 18 árboles plus A, utilizando semilla sexual (semilla) o clonándolos directamente (clon). Los resultados del diferencial de selección (S) que se presentan son los mismos que se analizaron en la Tabla 3, sólo que esta vez se les adiciona  $\pm$  una desviación estándar al valor promedio. Por lo tanto, aplica la misma interpretación y discusión.

Entre los cuatro caracteres considerados en el proceso de selección de árboles, los mayores niveles de ganancia genética esperada se obtuvieron en altura comercial ( $h_{COM}$ ) y volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ), tanto cuando se emplea la semilla sexual o se toma la decisión de clonar los árboles seleccionados. Las ganancias genéticas para  $h_{COM}$  oscilaron entre 13,75% (A+B, semilla) y 17,50% (A, clon); mientras que para el  $Vol_{COM}$  las ganancias estuvieron entre 22,25% (A+B, semilla) y 41,71% (A, clon), con respecto a los mejores árboles vecinos, considerados como testigos o población base (Tabla 6). Los resultados obtenidos son similares o mayores a los reportados por varios autores: a) Espitia *et al.* (2010), quienes en *A. mangium* reportan ganancias genéticas esperadas en promedio de árboles plus A de 22,24% y 48,57% en altura y volumen comercial, respectivamente; b) Vallejos *et al.* (2010), a su vez relacionan ganancias genéticas esperadas en general entre 20 - 25% en volumen; c) Mesén (2001), quien estimó ganancias genéticas en melina de 17% en altura y 43% en DAP; d) Cornelius & Hernández (1994), en la misma especie, reportaron ganancias genéticas de hasta 12% en rectitud del fuste; e) Kumar & Matharoo (2003), en melina a nivel clonal, encontraron para altura, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho, ganancias de un 18%, 25% y 30%; f) Rojas & Arias (2004), en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr., en la zona del Pacífico sur de Costa Rica, con ganancias del 23% en volumen. Los resultados de este estudio evidencian el riguroso proceso de selección realizado en las plantaciones evaluadas y permiten vaticinar un importante progreso genético.

Se observa en la Tabla 6, que se pueden lograr mayores ganancias genéticas en el programa de mejoramiento empleando solamente los 18 árboles plus A, en vez de utilizar todos los 46 árboles seleccionados (A+B), tanto utilizando su semilla o clonándolos.

Si en el programa de mejoramiento genético de teca se utilizara la semilla sexual de los mejores 18 árboles plus A (A, semilla), se obtendrían ganancias genéticas mayores al uso de la semilla de los 46 árboles seleccionados (A+B, semilla). En DAP se lograría un progreso genético de 2,35% adicional y de 12,5% adicional en el  $Vol_{COM}$ . Resultados similares en *Acacia mangium* fueron reportados por Espitia *et al.* (2010).

En general, para los cuatro caracteres de interés incluido en el estudio, el progreso genético esperado es mayor al clonar los 18 árboles plus A (A, clon) que al utilizar su semilla (A, semilla). Los valores de superioridad adicional oscilan entre un 1,11% (DAP) y un 6,96% ( $Vol_{COM}$ ) (Tabla 6). De acuerdo con Ipinza (1998) y Murillo & Badilla (2009), esta diferencia en ganancia genética a favor de la clonación de los árboles plus A, se explica porque en la clonación se captura el 100% de la información genética (efectos genéticos aditivos y no aditivos) de los árboles plus A; mientras que cuando se utiliza la semilla sexual originada de polinización abierta, sólo se captura el 50% de la información genética de los árboles plus A seleccionados (madre), ya que no se conoce al progenitor masculino.

La tendencia y superioridad de los valores de ganancia genética esperada determinada en este estudio, son consistentes con los índices de selección (IS) obtenidos, los cuales oscilaron entre 12,18% (A+B semilla) y 15,16% (A, clon) para las cuatro estrategias de mejoramiento posibles (Tabla 6). Esto señala que los árboles plus A, cuando son clonados (A, clon) generan la mayor ganancia genética esperada en volumen y calidad (IS = 15,16%), comparado con el uso de la semilla de tales árboles (A, semilla: IS = 13,26%) para obtener nuevas progenies.

Lo anterior implica que se esperaría una respuesta importante a la selección para los cuatro caracteres en estudio. De igual forma, de acuerdo a los valores de diferencial de selección, ganancia genética esperada y los índices de selección obtenidos, se puede argumentar que la clonación de los 18 árboles plus A seleccionados, producirá una población de árboles con mayores características de crecimiento y superior de calidad del fuste en las siguientes generaciones. Esto permitirá aumentar los rendimientos, la productividad y la calidad de la materia prima, en beneficio directo a los productores de madera y la industria, al producir árboles más homogéneos y menores desperdicios al momento de la cosecha. Este tipo de programas

contribuirá en hacer más sostenible, atractivo y equitativo el negocio forestal en el departamento de Córdoba y en Colombia en el largo plazo. Dado que la teca es una de las especies forestales que más se planta para la producción de madera sólida en las regiones tropicales del mundo.

Sí tenemos en cuenta que con incrementos del 4% por conceptos de ganancias genéticas en volumen se cubren los costos de un programa de mejoramiento genético forestal (Ipinza, 1998), los resultados obtenidos en este estudio permiten deducir alta rentabilidad económica en el programa que se adelanta en Córdoba.

De acuerdo con Murillo & Badilla (2009), sí se utiliza la estrategia de clonación de los árboles plus A, en aproximadamente 1 a 2 años se puede iniciar con el establecimiento de plantaciones clonales comerciales con material de alto rendimiento. Mientras que sí se utiliza la estrategia de semilla sexual (familias de medios hermanos), en aproximadamente 6 a 8 años (dependiendo de las condiciones edafológicas y climatológicas de la zona) se tiene semilla mejorada para abastecer la demanda de plantaciones.

A lo anterior, se le debe adicionar que la teca es una especie que se propaga vegetativamente y rebrota fácilmente. Los árboles plus seleccionados pueden ser incluso talados para iniciar su propagación vegetativa y los nuevos rebrotes pueden iniciar su propagación a partir de 6 a 8 semanas después de cortado el árbol. Estos niveles de progreso genético esperado, permiten adicionalmente, vaticinar una reducción de aproximadamente 1 a 2 años en el tiempo para alcanzar dimensiones de cosecha final, si y solo si, se siguen los principios del manejo oportuno de la plantación (Murillo & Badilla, 2009). Lo cual generará un alto impacto y estímulo a la reforestación con teca en el departamento de Córdoba.

Los 18 árboles plus A, por sus características superiores, pueden ser utilizados como progenitores para siembras comerciales (población comercial), utilizando su semilla sexual (aprovechamiento sólo de la varianza genética aditiva) o clonándolos directamente (aprovechamiento de toda la varianza genética) para lograr capturar la mayor ganancia genética potencial (Ipinza, 1998; Mesén, 2001; Murillo & Badilla, 2009; Vallejos *et al.* 2010). Sin embargo, como se observa en la Tabla 6, la mayor ganancia genética esperada en altura y volumen comercial, se obtiene con la clonación de los 18 árboles plus A, con valores de 17,50% y 41,71%, respectivamente. Los árboles plus B (28 restantes), no se incorporarán a la población comercial, dado que representan una condición de superioridad solamente en uno de los dos caracteres volumen ó calidad. Por lo tanto, formarán parte de la población de mejoramiento (investigación y desarrollo) y se mantendrán a la espera de su evaluación genética y su utilización en los cruzamientos controlados en el programa de mejoramiento de teca en Córdoba, como lo señalan Murillo & Badilla (2009) y Vallejos *et al.* (2010).

Los resultados encontrados le permiten igualmente al mejorador forestal, de acuerdo a sus recursos económicos y de suelos, definir si incluye en sus ensayos de progenies y de clones todos los 46 árboles seleccionados (A+B) o evalúa en tales pruebas solamente los 18 árboles plus A. Una prueba de progenie o clonal de los 18 árboles, replicada en al menos tres ambientes diferentes, es aceptable en este tipo de ensayos y permitiría, después del raleo genético, contar con sendos huertos semilleros de primera generación, que ofrecerían semilla de excelente calidad genética para nuevas siembras comerciales. De igual forma se contaría con material vegetal para clonar los mejores árboles de las mejores familias, con adaptación específica en cada ambiente. Esta estrategia haría posible que los árboles definitivos se crucen entre sí, forzando su recombinación genética, la acumulación de alelos favorables y por consiguiente la producción de semilla de calidad genética superior, para continuar con el proceso de mejoramiento (Ipinza, 1998; Mesén, 2001).

Como es de esperarse, es posible que se encuentren buenos genotipos en otras empresas, organizaciones o países. Por lo tanto, este grupo de árboles plus A que se han seleccionado y dado inicio a un programa de mejoramiento genético de teca en Córdoba, como lo señalan Murillo & Badilla (2009), permiten igualmente el desarrollo de modelos cooperativos o de alianza e intercambio de material genético con otras empresas u organizaciones. Esta estrategia junto con la introducción de germoplasma de nuevas procedencias fuera del país, hace posible reducir costos, aumentar variabilidad genética y reducir tasas de consanguinidad en la población de mejoramiento, lo que permitirían seguir obteniendo ganancias genéticas durante varias generaciones.

Los resultados obtenidos sugieren un progreso genético significativo en el mejoramiento de *Tectona grandis* en Córdoba. De acuerdo con Zobel & Talbert (1984) y Xavier *et al.* (2009), este avance integrado con el proceso de silvicultura clonal, con los mejores árboles élites, pueden constituir el complemento ideal de un programa de mejoramiento genético para esta especie.

Adicionalmente, hacen prever un aporte importante a la productividad, competitividad y sostenibilidad de la producción forestal en el departamento, de acuerdo a las exigencias de calidad del mercado internacional al cual se pretende llegar. No obstante es necesario corroborar este progreso genético, mediante ensayos genéticos apropiados en varias zonas productoras de Córdoba.

Según Murillo & Badilla (2009), con los resultados de los ensayos de evaluación genética se obtienen los parámetros genéticos de la población de mejoramiento (Varianzas, covarianzas, componentes de varianzas, heredabilidades, correlaciones genéticas, diferencial de selección y ganancias genéticas realizadas, entre otras). Con esta información, por lo general, se procede a eliminar un 30 a 50% de los materiales inferiores. Mientras que el material que registre un rendimiento superior, permanece para conformar la población de progenitores que darán base a la segunda generación de mejoramiento mediante un diseño de cruzamientos controlados. Sus descendencias se evaluarán en ensayos de progenie de segunda generación, que tardarán unos 6 a 8 años en brindar la información genética. Estos ensayos se convierten en Huertos Semilleros de segunda generación o se clonan los mejores individuos, dependiendo de la estrategia de mejoramiento a seguir. Esta segunda generación de mejoramiento, por lo general, se espera obtenga aproximadamente otro 25% adicional en volumen y rendimiento, así como material mucho más homogéneo. De ésta manera continúan obteniéndose nuevas generaciones de mejoramiento cada 8 a 10 años, aportando nuevo material con una ganancia genética esperada de un 20 a un 25%. La organización de las plantaciones clonales en campo puede realizarse a través de dos tipos: a) Lotes monoclonales o b) Lotes de clones mixtos, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada una. En ambos tipos de plantaciones clonales, se deben utilizar no menos de 15 genotipos, con el fin de garantizar una variabilidad genética mínima en campo y reducir los riesgos fitosanitarios (Murillo *et al.*, 2003).

## CONCLUSIONES

De los 46 árboles seleccionados, 18 (39%) fueron clasificados como plus A y los 28 (61%) restantes como plus B.

Al seleccionar y clonar los 18 mejores árboles plus A con base en el IS, se espera obtener ganancias genéticas de 5,52%; 17,50%; 41,71% y 9,59%, para los caracteres DAP,  $h_{COM}$ ,  $Vol_{COM}$  y CALL, respectivamente.

Los resultados obtenidos sugieren un progreso genético y económico significativo en el mejoramiento de *Tectona grandis* en Córdoba.

Los 46 árboles plus localizados en el Departamento de Córdoba, constituyen una base genética relativamente pequeña, insuficiente para sustentar un programa de mejoramiento genético a largo plazo con esta especie. Es absolutamente imprescindible realizar esfuerzos por introducir nuevas procedencias y realizar intercambio de germoplasma, con el fin de ampliar la base genética de este programa.

Es necesario comprobar este gran potencial de mejoramiento genético, mediante ensayos genéticos en varias zonas productoras de Córdoba.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, Universidad de Córdoba, Cadena Forestal de Córdoba, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y 3F Kanguroid, por la cofinanciación y apoyo logístico, para la realización del proyecto "Selección de árboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y acacia (*Acacia mangium* Willd.) en el departamento de Córdoba", de donde se originó esta publicación.

## LITERATURA CITADA

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. 10(1): 13-19

- Blada, I., Popescu, F. 2008. Diallel crossing in *Pinus cembra*: IV. age trends in genetic parameters and genetic gain for growth and branching traits Ann. For. Res. 51:89-112.
- Botrel, M.C.G.; Moreira da Silva, J.R.; Trugilho, P.F.; Da Silva, S.C.; Bruno Ricardo, B.F. 2007. Ganho genético em propriedades físicas e mecânicas de clones de eucalipto. Science Forestry, Piracicaba. V. 76 (1): 13-19.
- CFC-Cadena Forestal de Córdoba. 2000. Acuerdo Regional de Competitividad para la Cadena Forestal en el Departamento de Córdoba. 14p. [http://www.conif.org.co/docs/acuerdo\\_reg\\_cordoba.doc](http://www.conif.org.co/docs/acuerdo_reg_cordoba.doc) (Accesado: 12-23-2009).
- CONIF-Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 1998. Guía para plantaciones forestales en Córdoba. Serie de documentación No. 34. Corporación Nacional de Investigación y Fomento forestal-CONIF; Ministerio del Medio Ambiente-MMA y Organización Internacional de Maderas Tropicales-OIMT. 48p.
- CONIF-Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 2003. Cadena Forestal Productiva de Córdoba. Folleto Núcleos Forestales. [http://www.conif.org.co/docs/cadena\\_folleto\\_interior.pdf](http://www.conif.org.co/docs/cadena_folleto_interior.pdf) (Accesado: 04-10-2009).
- Cornelius, J. 1994. The effectiveness of plus-tree selection for yield. Forest Ecology and Management. No. 67: 23-34.
- Cornelius, J. y Hernández, M. 1994. Variación genética en crecimiento y rectitud del fuste en *Gmelina arborea* en Costa Rica. Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales, 10: 9-12.
- Cruz, Cosme D. 2005. Principios de Genética Cuantitativa. Universidade Federal de Viçosa. Editora UFV. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 394p.
- Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C.; Araméndiz, H.; 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. Vol.13, Número 2: En impresión.
- Fonseca, W. 2004. Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L.) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica. 115p.
- Ipinza, R. 1998. Mejoramiento genético forestal. Serie Técnica N°42, Programa CONIF-Ministerio de Agricultura sobre investigaciones en semillas de especies forestales nativas. INSEFOR. Santa fe de Bogotá, Colombia. 162p.
- Kumar, A y Matharoo, AK. 2003. Genetic improvement of *Gmelina arborea* in India. In: Recent Advances with *Gmelina arborea* (eds. W. S. Dvorak, G. R. Hodge, W. C. Woodbridge and J. L. Romero). North Carolina State University. Raleigh, NC. US. CAMCORE. 221p.
- Ladrach, W. 2010. Expansion of pulp production in the third world. [http://www.allegheysaf.org/winter\\_2010.htm](http://www.allegheysaf.org/winter_2010.htm) (Accesado: 02 - 26 - 2010).
- MADR-Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2005. Características y estructura del sector forestal-madera-muebles en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Documento de trabajo no. 95. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia. 63p.
- Mesén, F. 2001. Introducción al mejoramiento genético forestal. En: Identificación, selección y manejo de fuentes semilleras. Serie Técnica / No. 32. Convenio CONIF, INSEFOR y MADR. Bogotá, septiembre. ISSN 0121-0300. 118p.
- Murillo, O y Badilla, Y. 2004. Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 50 p.
- Murillo, O y Badilla, Y. 2009. Reproducción clonal de árboles. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, ITCR. Cartago, Costa Rica. 45 p.
- Murillo, O. y Badilla, Y. 2003. Potencial de mejoramiento genético de la Teca en Costa Rica. En: Simposio sobre la teca. 26-28 noviembre del 2003. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. CD.
- Murillo, O. y Badilla, Y. 2005. ¿Qué es mejoramiento genético forestal?. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 14 p.
- Murillo, O; Obando, G.; Badilla, Y. & Araya, E. 2004. GENFORES, a Costa Rican tree improvement and gene conservation cooperative. En: IUFRO Meeting. Forest Genetics and Genomics. 1 – 5 de November. Charleston, South Carolina, USA.

- Murillo, O; Rojas, J.L; Badilla, Y. 2003. 2ed. Reforestación Clonal. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica 36 p.
- Oh, C.Y.; Han, S.U.; Mm, C. S.; Kang, K. S.; Lee, B. S. 2008. Genetic gain and diversity in a clonal seed orchard of *Pinus Koraiensis* under various thinning intensities. Korean Journal of Breeding Science. Vol. 40(No.3): 263-268.
- Rincón, M. 2009. El sector forestal en Córdoba: Cadena productiva forestal madera y muebles departamento de Córdoba. Informe Cadena Forestal de Córdoba, Febrero de 2009 (Centro de Investigaciones Turipaná – Corpoica). 37p.
- Rocha, R.B.; Vieira, A.H.; Bentes, M.D.; Brum, L.M. 2009. Avaliação genética de procedências de bandarra (*Schizolobium amazonicum*) utilizando REML/BLUP (Máxima verossimilhança restrita/Melhor predição linear não viciada. Sci. For., Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 351-358
- Rodríguez, J. y Nieto, V. 1999. Investigación en semillas forestales nativas. Serie Técnica No. 43. ISSN 0121-0300. Programa de Investigación en Semillas Forestales Nativas – INSEFOR. Convenio CONIF – Ministerio de Agricultura. 89p
- Rojas F., Arias D. 2004. Manual para productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, 86p.
- SangUrk, H.; KyuSuk, K.; Byoung Hwan, C. y ChangSoo, K. 2007. Realized genetic gains and heritabilities for height, DBH and volume growth in open-pollinated progenies of *Pinus thunbergii*. Korean Journal of Breeding Science 2007 Vol. 39 No. 1 pp. 15-19.
- Trujillo, E. 2009. Guía de reforestación. 2<sup>da</sup> Edición. Los arboles. Adaptación, características, producción, usos, manual de vivero, plantación y manejo silvicultural. 255p.
- Vallejos, Jonathan; Badilla, Yorleny; Picado, Félix y Murillo, Olman. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. Agronomía Costarricense. Vol.33, Número 1: 105-119.
- Verryn, S.D.; Snedden, C.L.; Eatwell, K.A. 2009. A comparison of deterministically predicted genetic gains with those realized in a South African *Eucalyptus grandis* breeding program. Journal of Forest Science, Menlo Park, v.71, n.2: 141-146.
- Xavier, Aloisio; Wendling, Ivar; da Silva, Rogério. 2009. Silvicultura Clonal. Princípios e Técnicas. Editorial Universidad Federal de Vicosa. Vicosa, Minas Gerais, Brasil. 272 p.
- Zobel, B y Talbert, J. 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley & Sons. New York, USA. 510p.
- Zobel, B. y Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de arboles forestales. Ed. Limusa. México D.F. 545p.

Tabla 1. Localización (municipios y finca) de las plantaciones donde se realizó la selección de árboles plus de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Municipio	Finca	Área reforestada (Has)	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
PUERTO LIBERTADOR	Reforestadora del Caribe	2.200	07°51'33,2"	075°43'22,4"
CANALETE	Hacienda El Páramo	2.700	08°37'46,3"	076°15'04,3"
CANALETE	Palma Vino	130	08°44'02,3"	076°15'55,3"
SAN ANTERO	Refopal	150	09°18'26,6"	075°50'20,6"
MOMIL	Santo Tomás	6	09°20'11,2"	075°38'14,5"
MONTERIA	Santa Elena	130	08°33'48,9"	075°58'40,7"
Total		5.316		

Tabla 2. Árboles seleccionados e intensidad de selección por lote en las poblaciones estudiadas de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Municipio	Finca	Árboles plus Seleccionados	Intensidad de Selección (árboles)
PUERTO LIBERTADOR	Reforestadora del Caribe	21	1 de 37.400
CANALETE	Hacienda El Páramo	12	1 de 48.333
CANALETE	Palma Vino	0	0
SAN ANTERO	Refopal	12	1 de 20.625
MOMIL	Santo Tomás	1	1 de 2.200
MONTERIA	Santa Elena	0	0
Total (A+B)		46	1 de 36.193
Plus A		18	1 de 92.493

Tabla 3. Diferencial de selección promedio (S) por finca, de los árboles plus de *T. grandis* seleccionados en el departamento de Córdoba, Colombia\*.

Finca	Árboles	S DAP (%)	S h <sub>COM</sub> (%)	S Vol <sub>COM</sub> (%)	S CALI (%)	Índice de Selección (IS) (%)
Canalete (Páramo)	12	7,31	54,79	79,75	24,23	36,90
San Antero (Refopal)	12	16,60	39,69	90,47	23,51	29,41
Momil (Santo Tomás)	1	8,68	53,85	78,37	18,65	30,91
Puerto Libertador (Reforestadora del Caribe)	21	5,84	57,80	73,21	25,25	49,45
Global (A+B)	46	10,32	55,00	88,99	23,70	34,82
Plus A	18	22,07	58,33	139,02	23,98	37,90

\*Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (h<sub>COM</sub>), Volumen comercial (Vol<sub>COM</sub>), Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100 e Índice de Selección (íntegra Volumen Comercial\*0,6 con la calidad\*0,4).

Tabla 4. Diferencial de selección en relación con la calidad de las primeras cinco trozas (2,5m de largo) entre los árboles plus y sus mejores vecinos, de *Tectona grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Altura en el fuste (m)	Árboles Plus (A + B)	Árboles Plus A	Mejores Vecinos	Diferencia con Plus A (%)	Diferencia Plus A con según de importancia troza (%)	Peso económico de la troza (%)
12,5	0,67	0,79	0,00	79,00	3,95	5
10	0,79	0,92	0,00	92,00	13,80	15
7,5	0,93	0,97	0,53	82,11	16,42	20
5,0	1,00	1,00	0,84	18,77	4,69	25
2,5	1,00	1,00	0,99	1,46	0,51	35
Total					39,37	100

Tabla 5. Valores promedios para altura comercial (h<sub>COM</sub>), diferencial de selección de la altura comercial (h<sub>COM</sub> %), Calidad del fuste (CALI) y diferencial de selección en calidad del fuste (CALI %), en los árboles plus seleccionados y en los mejores vecinos de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia\*.

Grupo	Árboles	h <sub>COM</sub> (m)	Diferencial h <sub>COM</sub> (%)	CALI	Diferencial CALI (%)
Plus A	18	12,54 (0,59)	58,33 (5,79)	0,99 (0,010)	23,98 (2,22)
Plus (A+B)	46	12,24 (0,36)	55,00 (3,97)	0,96 (0,011)	23,70 (1,48)
Testigos (mejores vecinos)	184	8,20 (0,15)		0,78 (0,099)	

\*Altura comercial (h<sub>COM</sub>) y Calidad del fuste (CALI) de 0 a 100. Desviaciones estándar entre paréntesis.



Tabla 6. Diferencial de selección (S) y ganancia genética (GG) esperada por categoría de árboles plus de *T. grandis* seleccionados en el departamento de Córdoba, Colombia.

Caracteres	S Plus (A + B) (%)	S Plus A (%)	GG (%) (A + B, semilla)	GG (%) (A, semilla)	GG (%) (A + B, clon)	GG (%) (A, clon)
DAP	10,32 (2,13)	22,07 (9,28)	2,06	4,41	2,58	5,52
h <sub>COM</sub>	55,00 (3,97)	58,33 (5,79)	13,75	14,58	16,5	17,50
Vol <sub>COM</sub>	88,99 (10,37)	139,02 (20,49)	22,25	34,75	26,70	41,71
CALI	23,70 (2,31)	23,98 (2,22)	8,29	8,39	9,48	9,59
Índice de Selección (IS)	34,82 (2,44)	37,90 (3,63)	12,18	13,26	13,93	15,16

\*Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (h<sub>COM</sub>), Volumen comercial (Vol<sub>COM</sub>) y Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100. \*La calidad se evaluó solamente en 28 árboles plus.

Desviaciones estándar entre paréntesis.

## **Apéndice 2**

### **Libro:**

Murillo, O.; Espitia, M. y Castillo, C. 2012. Fuentes Semilleras para la Producción Forestal. 1ª ed. Editorial Domar S.A.S. Bogotá, Colombia. 184 p.

### **Capítulos del libro que incluyen información del proyecto de investigación**

## Capítulo 5. Ganancia genética esperada con la utilización de árboles superiores

### 5.1. Importancia de la ganancia genética

La actividad forestal ha aumentado significativamente como consecuencia de la escasez de madera del bosque natural y la creciente demanda de productos forestales por parte de la población. Sin embargo, 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 (Murillo & Badilla, 2004a).

El desarrollo de las tecnologías de propagación *in vivo* han permitido un progreso asombroso en el cultivo de eucaliptos en el mundo (Xavier *et al.* 2009), donde la productividad avanzó de  $200\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  en los años 70's, a superar actualmente la barrera de los  $400\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  a nivel operativo, con resultados de investigación que superan los  $500\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  en 7 años. Estos resultados son el producto de la visión de las plantaciones como un cultivo, donde confluyen tres componentes vitales: Suelo + Semilla + Manejo (Murillo & Badilla, 2005).

El éxito de un programa de mejoramiento genético depende de la calidad e intensidad de selección (rigor) de los árboles parentales. Las ganancias esperadas dependen tanto del control genético de las características de interés como de la variabilidad existente en la población (Zobel & Talbert, 1988; Balcorta & Vargas, 2004). La heredabilidad en sentido estricto y el diferencial de selección son útiles para predecir la respuesta de la selección en especies forestales (Zobel & Talbert, 1988). El genetista puede incrementar el diferencial de selección para obtener una mayor ganancia genética, pero con el cuidado de no reducir el número de árboles seleccionados o población de mejoramiento. Lo que podría ocasionar una mayor consanguinidad o endogamia en la progenie resultante. El diferencial de selección es importante porque está altamente correlacionado con la ganancia genética, que es el fin de un programa de mejoramiento genético (Balcorta & Vargas, 2004).

Según White *et al.* (2007), es importante cuantificar la ganancia genética potencial, esperada o realizada en las distintas etapas de los programas de mejoramiento forestales con el fin de: **a)** Seleccionar entre las alternativas de apareamiento y diseños experimentales para pruebas genéticas, **b)** Evaluar las posibles estrategias de mejoramiento, **c)** Decidir sobre cuáles caracteres enfatizar el proceso de selección, **d)** Justificar la eficacia del programa (por ejemplo, mediante la comparación de las ganancias y la rentabilidad económica de las plantaciones mejoradas y no mejoradas) y **e)** Desarrollar programas de cosecha y estimar los flujos de madera de una plantación compuesta de poblaciones con diferentes niveles de mejoramiento.

Adicionalmente, las estimaciones de ganancia genética esperada le permiten al mejorador forestal conocer su progreso genético potencial y decidir al inicio del programa, cuáles individuos componen la población comercial y cuáles la población de mejoramiento (Vallejos *et al.* 2010).

### 5.2. Definiciones y conceptos.

La ganancia genética es la diferencia observada en un carácter de interés (DAP, altura, volumen, etc), entre la media de una población seleccionada y la media de una población sin selección. Normalmente esta ganancia se estima para un carácter cuantitativo determinado, por ejemplo diámetro, altura o volumen comercial. Existen formas diversas de estimar la ganancia genética en árboles forestales. De manera general ésta se calcula

mediante la estimación del promedio de una caracter (ej. diámetro a la altura del pecho) en la población seleccionada y se le compara con el promedio de la población no seleccionada. Con esta forma sencilla podremos tener una idea del promedio que potencialmente la próxima generación de árboles (producida a partir de los arboles seleccionados) alcanzará, suponiendo el mismo manejo y las mismas características ambientales (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010).

En todos los programas de mejoramiento forestal, se busca aumentar las frecuencias de alelos favorables en la población que influyen en los caracteres seleccionados. Sin embargo, para los rasgos poligénicos (cuantitativos) es imposible medir el cambio en las frecuencias alélicas, y de hecho, el cambio de frecuencia en un ciclo de selección es pequeño en cada uno de los loci que controlan la expresión de cualquier carácter dado. Por esta razón, se ha ideado un concepto para medir la eficacia de los programas de mejoramiento de árboles, llamada **ganancia genética**. En la literatura el lector puede encontrar los términos: **avance genético** o **progreso genético**, para referirse al mismo concepto de **ganancia genética**, la cual puede ser simbolizada por  **$\Delta G$**  ó **GG**.

La ganancia genética, es la variación o diferencia entre la media de una nueva progenie (población) obtenida en un ciclo de selección para cada caracter evaluado (**población mejorada: Pm**) y la media de la **población parental o base (Po)** de donde se originó el ciclo de selección. Desde el punto de vista genético, esta es cuantificada como el incremento en el promedio del valor genético o valor de mejoramiento entre las dos poblaciones.

Debido a que la selección de árboles plus se realiza sobre su fenotipo, el concepto de ganancia genética está basado en el cambio que se genera en la media de un carácter de interés en una población parental o base (**Po**), como consecuencia de la realización de un ciclo de selección. Un ciclo de selección involucra el establecimiento de una población variable genéticamente (**Po**), sobre la cual se seleccionan, evalúan y aíslan un grupo de individuos superiores que actuarán como padres para conformar una nueva **población mejorada (Pm)** para el próximo ciclo de selección. En la Figura 5.1 se ilustran los tres tipos de población que se generan en un ciclo de selección fenotípica: Población parental o base (**Po**), población seleccionada (**Ps**) y población mejorada (**Pm**).

La ganancia genética se puede expresar en las mismas unidades de la característica de interés medida (altura en m; volumen en m<sup>3</sup>; etc.) o en porcentaje. Tomando como ejemplo los datos promedios de altura comercial de árboles de teca dados en las Figura 5.1, tenemos entonces que:

$$\Delta G = (Pm - Po) = (12 - 8) = 4m \quad (\text{Expresada en "m"})$$

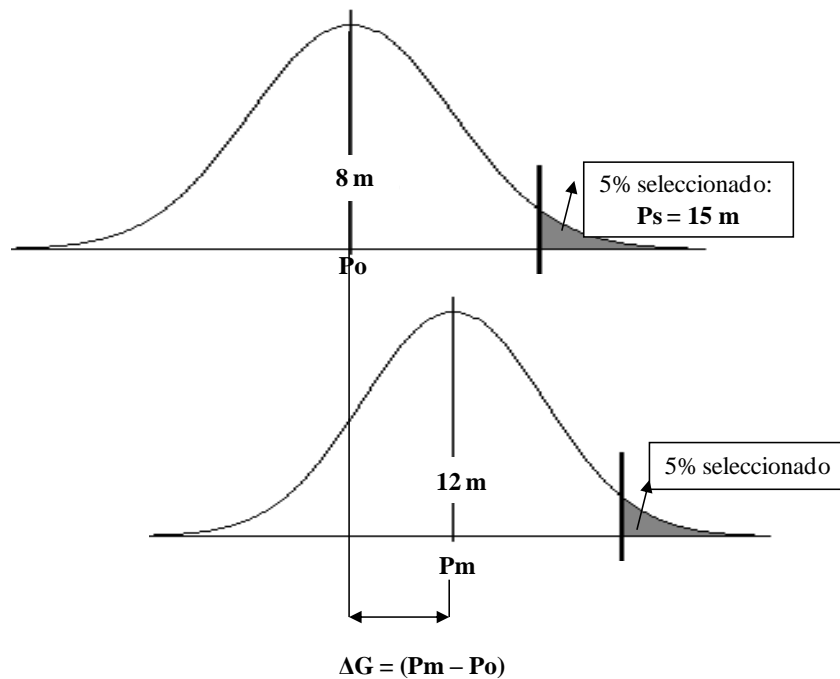
La ganancia genética se puede convertir en un valor porcentual dividiendo la diferencia anterior por la media de la población base (**Po**) desde la cual se hicieron las selecciones y multiplicando por 100, como se ilustra a continuación:

$$\Delta G = [(Pm - Po)/Po]*100 = [(12 - 8)/8]*100 = 50\% \quad (\text{Expresada en "\%"})$$

Una  $\Delta G$  de 4m y 50%, indica que como resultado del proceso de selección la altura de los árboles en la población mejorada (**Pm**) se incrementó en 4m o en un 50%, respecto a la población original (**Po**).

Un concepto relacionado con la ganancia genética es el **diferencial de selección**, la cual se simboliza por **S**. El diferencial de selección es conceptualmente la diferencia entre la media fenotípica de los individuos seleccionados (**Población seleccionada: Ps**) y la media fenotípica de la población base parental (**Po**). El diferencial de selección es algunas veces llamado el **alcance** (White *et al.*, 2007), ya que es el límite máximo superior de la ganancia genética. El diferencial de selección puede expresarse en las mismas unidades de la característica de interés medida o en porcentaje. Con base en los datos promedios de altura comercial de árboles de teca dados en las Figura 5.1, se tiene:

$$S = (P_s - P_o) = (15 - 8) = 7m \quad (\text{Expresada en "m"})$$



**Figura 5.1.** Ganancia genética por cambio en la media de dos poblaciones  $P_o$  y  $P_m$

El diferencial de selección se puede convertir en un valor porcentual dividiendo la diferencia anterior por la media de la población base ( $P_o$ ) desde la cual se hicieron las selecciones y multiplicando por 100, como se ilustra a continuación:

$$S = [(P_s - P_o)/P_o] * 100 = [(15 - 8)/8] * 100 = 87,5\% \quad (\text{Expresada en "\%"})$$

Un  $S$  de 7m y 87,5%, indica que como resultado del proceso de selección, la altura de los árboles seleccionados ( $P_s$ ) se incrementó en 7m o en un 87,5%, respecto a la población original ( $P_o$ ).

Las anteriores fórmulas pueden extenderse y aplicarse para realizar estimaciones de diferencial de selección y ganancia genética esperada en cualquier proceso de selección de árboles superiores, en cualquier especie forestal y/o carácter de interés, lo cual originaría las siguientes estimaciones:

- S** y  **$\Delta G$**  para un árbol candidato frente a sus mejores cuatro vecinos en un radio de 20m.
- S** y  **$\Delta G$**  promedio para un lote o plantación determinada.
- S** y  **$\Delta G$**  promedio para una localidad específica.

- d) **S** y **ΔG** promedio para todos los árboles plus (A+B) seleccionados.
- e) **S** y **ΔG** promedio para los árboles plus A.
- f) **S** y **ΔG** promedio por ciclo de mejoramiento.
- g) **S** y **ΔG** promedio para un programa de mejoramiento específico.

Aunque en la literatura se reportan estimaciones de **S** y **ΔG** en las unidades del carácter de interés y en porcentaje, los valores en % son más frecuentes. Posiblemente, ello se deba a que tales estimaciones eliminan los efectos de las unidades de los diferentes caracteres y permiten comparar los valores de **S** y **ΔG** entre varias especies, caracteres, plantaciones, poblaciones, localidades, ciclos, etapas del programa y entre varios programas de mejoramiento, con el objeto de realizar los análisis, seguimiento, evaluación, ajustes y definir las prioridades pertinentes hacia el futuro en nuestro programa.

En la Tabla 5.1 se presentan algunas ilustraciones de **S** y **ΔG** en el proceso de selección de acacia en Córdoba (Colombia), para los diferentes niveles de estimación.

Tabla 5.1. Diferencial de selección (S) y ganancia genética (GG) esperada por grupo de árboles seleccionados de *Acacia mangium* en el departamento de Córdoba, Colombia (Espitia *et al.*, 2010a)

Grupo de árboles	DAP	ALCO	VOLCO	CALI
S global de 89 árboles (%)	10,3	70,6	118,1	48,6
S de 32 árboles plus A (%)	22,4	89,0	194,3	51,7
S de 15 árboles plus A (%)	21,9	119,0	247,0	68,2
GG esperada Global de 89 árboles (%)	2,06	17,64	29,53	19,44
GG esperada de 32 árboles plus A (%)	4,48	22,24	48,57	20,67
GG esperada de 15 árboles plus A (%)	4,57	31,08	64,93	26,64

\*Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (ALCO), Volumen comercial (VOLCO) y Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100.

### 5.3. Tipos de ganancia genética

Existen dos tipos de ganancia genética: **a) ganancia genética esperada o predicha**, la cual es calculada a partir de fórmulas derivadas de la teoría de genética cuantitativa y **b) ganancia genética realizada**, la cual es obtenida de experimentos (ensayos genéticos) que evalúan genotipos mejorados junto con no mejoradas (o genotipos con diferentes niveles de mejoramiento) aleatorizados, en ensayos de rendimiento replicados y en varios sitios o ambientes. La ganancia genética esperada conocida también como **tipo 1**, como su mismo nombre lo indica, es una expectativa de ganancia que se podría lograr hacia futuro por el uso de un nuevo genotipo o de un tipo de selección. En la literatura se puede encontrar reportes de ganancias esperadas para diferentes especies, métodos de mejoramiento y/o selección y caracteres de interés. La ganancia realizada o **tipo 2** es retrospectiva o pasada, ya que los resultados se obtienen varios años después de la siembra del o los experimentos o ensayos genéticos. Para entonces, los genotipos evaluados pueden no estar mayormente en uso o han sido reemplazados por nuevos genotipos aún mejores. La ganancia realizada se reporta con menos frecuencia en la literatura, debido al tiempo y costo requerido para obtener resultados confiables. Sin embargo, estos tipos de experimentos son críticos, ya que proporcionan evidencia empírica directa de los progresos conseguidos de un programa de mejoramiento forestal (White *et al.*, 2007).

Cuando cualquiera de las ganancias genéticas esperadas o realizadas es estimada para edades de plantaciones jóvenes, las estimaciones son algunas veces incorporadas en los modelos de crecimiento y rendimiento de computador para estimar edad de rotación, rendimientos y el impacto final de la ganancia genética en términos de producción forestal. La ganancia obtenida por simulación en modelos (**ganancia simulada**) es un tercer tipo de ganancia genética estimada, obtenida por la incorporación de varios supuestos sobre los genotipos mejorados y no mejorados incluidos en el modelo. Las ganancias son estimadas por la comparación de los rendimientos simulados de varias corridas de computador, para diferentes niveles de mejoramiento como se especifica en los supuestos dados a los modelos (White *et al.*, 2007).

Las posibles opciones de estimación de ganancias genética, según el tipo de población y ciclos de mejoramiento, convierten en un reto poder comparar las ganancias relativas que puedan ser esperadas con la utilización de ciertos genotipos, incluso por un solo programa de mejoramiento forestal. Tenga en cuenta la difícil situación de un inversionista en reforestación que desee comprar árboles mejorados para plantar y tener muchas opciones disponibles. Un método eficaz de etiquetado que especifique claramente el nivel relativo de mejora que se espera en los diferentes caracteres para cada genotipo disponible sería el método más útil de comparación. Aunque estos sistemas de etiquetado son raros, se ha desarrollado uno para *Pinus radiata* en Nueva Zelanda en el cual las relaciones de crecimiento y forma (CF) son asignados a cada genotipo disponible. Una relación de CF de 1 corresponde a un genotipo no mejorado y una relación >1 indica una mayor tasa de mejoramiento (White *et al.*, 2007).

#### 5.4. Formas de estimar la ganancia genética.

Aún cuando existen varias fórmulas para estimar la **ganancia genética esperada** (GG), la más utilizada es la que sugieren varios autores (Zobel & Talbert, 1984; Murillo *et al.*, 2004; Cruz, 2005; Vallejos *et al.*, 2010) a través de la siguiente ecuación:

$$GG = S \cdot h^2$$

Donde: “S” es el diferencial de selección y  $h^2$  es la heredabilidad en sentido estrecho (en razón a que son los genes con efectos aditivos los que responden a la selección, al pasar de padres a sus progenies). Esta ecuación indica que la GG está en función directa de S y  $h^2$ . El mejorador forestal puede manipular la heredabilidad de los caracteres de interés (Con buenos ensayos genéticos, ya que la heredabilidad se obtiene de un cociente entre algún tipo de varianza genética/varianza fenotípica. Por tanto, cada vez que logremos controlar mejor los efectos ambientales, bloques, repeticiones, etc., la varianza fenotípica tiende a disminuir) y también puede incrementar el diferencial de selección (seleccionando a los mejores individuos superiores) para obtener ganancias importantes, con el cuidado de no reducir desmedidamente el número de árboles seleccionados. Ya que puede generar efectos negativos de consanguinidad o endogamia en la progenie resultante, a causa de la expresión de genes deletéreos.

El S se estima mediante cualquiera de las dos fórmulas presentadas anteriormente, en unidades de la variable de interés o en porcentaje (ver sección 5.2). Como valor de heredabilidad en sentido estrecho puede utilizarse la  $h^2$  promedio reportada para los caracteres forestales que se estén estudiando. Cornelius (1994) realizó una amplia revisión sobre valores de heredabilidad y reportó que por lo general los caracteres cuantitativos registran valores bajos (<0,30), mientras que caracteres cualitativos aparecen en la literatura con valores más altos:

$$h^2_{\text{Diámetro}} = 0,20; h^2_{\text{Altura}} = 0,25; h^2_{\text{Volumen}} = 0,25 \text{ y } h^2_{\text{Calidad}} = 0,35.$$

Considerando que el diferencial de selección se puede descomponer en:

$$S = i \cdot \sigma_p$$

Donde “*i*” es una constante basada en la intensidad de selección en unidades de desviación estándar (como se muestra a continuación), mientras que “ $\sigma_p$ ” es la desviación estándar o raíz cuadrada de la varianza fenotípica de la población para el carácter de interés.

Los valores de *i* difieren según la intensidad de selección y se encuentran en tablas estadísticas. Los valores más comunes de *i* para algunas intensidades de selección que aplican comúnmente los fitomejoradores son:

Intensidad de selección (%)	<i>i</i>
1	2,665
5	2,063
10	1,755
20	1,400

De igual forma la heredabilidad en sentido estrecho se puede expresar como:

$$h^2 = \sigma_A^2 / \sigma_P^2$$

Entonces la fórmula de la ganancia genética se puede escribir de la siguiente forma:

$$GG = S \cdot h^2 \quad ; \quad \text{reemplazando } S = i \cdot \sigma_p \text{ se obtiene:}$$

$$GG = i \cdot \sigma_p \cdot h^2 \quad ; \quad \text{reemplazando } h^2 = \sigma_A^2 / \sigma_P^2 \text{ se obtiene:}$$

$$GG = i \cdot \sigma_p \cdot \sigma_A^2 / \sigma_P^2 \quad ; \quad \text{simplificando queda:}$$

$$GG = i \cdot \sigma_A^2 / \sigma_P$$

Como se puede notar la ganancia genética, mediante esta forma dependerá de la variabilidad genética de la población parental ( $P_0$ ), dada por la varianza aditiva ( $\sigma_A^2$ ) y la raíz cuadrada de la varianza fenotípica ( $\sigma_P$ ); del efecto del medio ambiente, originada por la raíz cuadrada de la varianza fenotípica ( $\sigma_P$ ) que contiene tales efectos; de la intensidad de selección (*i*) y si sólo se reemplaza el **S** en la fórmula; depende de la heredabilidad ( $h^2$ ) del carácter de interés.

Cuando la ganancia genética obtenida corresponde a un ciclo de mejoramiento y se desea conocer la ganancia genética por año ( $GG_y$ ), entonces ésta, se obtiene dividiendo la GG estimada por ciclo entre el número de años requeridos (*y*) para completar un ciclo de selección.

$$GG_y = GG/y = (S \cdot h^2)/y \quad \text{ó}$$

$$GG_y = GG/y = (i \cdot \sigma_p \cdot h^2)/y \quad \text{ó}$$

$$GG_y = GG/y = (i \cdot \sigma_A^2 / \sigma_P)/y$$

La **ganancia genética realizada**, se obtiene a través de la siembra de ensayos genéticos de progenies más algunos testigos, donde se utilizan diseños experimentales eficaces y eficientes (Bloques completos al azar, bloques incompletos, látices, bloques completos al azar con genotipos



pareados, etc), con los genotipos en evaluación aleatorizados, con tres a cuatro repeticiones por ensayo y plantados en al menos tres localidades productoras. Con los datos de campo de estos ensayos genéticos para los caracteres de importancia (DAP, altura comercial, volumen comercial, rendimiento, sanidad y calidad de la madera), mediante análisis estadísticos específicos, se estiman los parámetros genéticos de la población de mejoramiento (Varianzas, covarianzas, componentes de varianzas, heredabilidades, correlaciones genéticas, diferencial de selección y ganancias genéticas realizadas, entre otras). Con esta información, por lo general, se procede a eliminar entre un 30 a 50% de los materiales de inferior comportamiento.

En razón a que generalmente es deseable expresar la ganancia genética en una forma que integre todos los caracteres de interés en la selección y, sea fácilmente traducida en un valor o ganancia total del producto; con la GG esperada obtenida, se puede construir un Índice de Selección (**IS**) que integra de forma ponderada el volumen comercial (**Vol<sub>COM</sub>**) con la calidad integral (**CALI**) de cada árbol, a través de la siguiente ecuación propuesta por Murillo *et al.* (2004) y Vallejos *et al.* (2010):

$$IS = [(0,6 * Vol_{COM} - x/ds) + (0,4 * CALI - x/ds)]$$

En donde “**x**” es el valor medio y “**ds**” es la desviación estándar de cada carácter,

Con base en el “**IS**” se obtienen y clasifican los mejores árboles plus seleccionados, los cuales pueden constituir la población comercial (plus A) y el resto de los árboles (plus B) forman parte únicamente de la población de mejoramiento e investigación. Todos estos cálculos se pueden realizar en una hoja electrónica de Excel aplicando las fórmulas antes mencionada a los datos tomados en campo durante el proceso de selección.

En la Tabla 5.2, se presentan a modo de ejemplos los resultados de S, GG e IS obtenidos para los mejores 15 árboles plus A de acacia seleccionados en plantaciones comerciales en el departamento de Córdoba (Colombia).

Según White *et al.* (2007), las estimaciones de ganancia genética son comúnmente obtenidas para las diferentes etapas de los programas de mejoramiento forestales y diferentes tipos de población. En cualquier ciclo dado de mejoramiento, el progreso genético se espera que sea menor para la población base (Po), mayor para la población seleccionada (Ps) y la más alta para la población de propagación (Pm) o también conocida como población comercial. La población base o parental, al tener mayor número de árboles y más diversidad genética, tiene un menor valor genético promedio que la población seleccionada, constituida por los individuos superiores seleccionados de la población base parental.

Tabla 5.2. Ranking, código del árbol, diferencial de selección (S), índice de selección (IS) y ganancia genética esperada (GG) para los 15 mejores árboles plus seleccionados de *Acacia mangium* en el departamento de Córdoba, Colombia\*(Espitia *et al.*, 2010a).

Clasificación	Código árbol	S DAP	S ALCO	S VOLCO	S CALI	IS
1	21112	28,7	256,3	558,7	56,3	3,6
2	41004	79,6	123,2	620,4	36,6	3,4
3	11024	20,6	233,3	401,7	64,3	3,0
4	21089	19,3	89,6	174,1	108,9	2,9
5	11012	27,5	200,0	385,9	47,2	2,6

6	11023	11,3	147,9	218,4	78,0	2,5
7	21067	17,2	177,5	284,6	62,3	2,5
8	11010	8,1	64,6	94,0	86,6	2,1
9	31029	8,6	45,2	68,9	90,4	2,1
10	31005	19,0	118,8	221,4	52,7	2,0
11	31008	36,9	63,3	207,0	52,7	1,9
12	21053	26,9	80,8	195,3	52,7	1,9
13	31028	7,5	59,8	91,4	75,0	1,9
14	21071	8,6	80,0	114,2	68,8	1,8
15	21084	33,9	73,6	226,0	40,6	1,8
Promedio		22,85	124,31	259,72	66,59	
Varianza		333,42	4542,91	27713,67	398,54	
Error estándar		4,88	18,01	44,49	5,34	
GG esperada (%)		4,57	31,08	64,93	26,64	

\*Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (ALCO), Volumen comercial (VOLCO), Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100, GG = ganancia genética e IS = Índice de selección (volumen 60% + calidad 40%).

La diversidad genética es menor y la ganancia genética mayor para la población de propagación o comercial, la cual contiene los mejores individuos usados para producir plantas para reforestación. Esta relación inversa (mayor ganancia asociada con menor diversidad genética) es la razón principal para usar diferentes tipos de población con diferentes funciones. Aunque la población más grande seleccionada tiene menor ganancia genética en cualquier ciclo de mejora, se debe conservar una diversidad genética suficiente para garantizar ganancia genética en el largo plazo, así como para tener a mano materiales resistentes o rústicos de importancia a futuro. La población de propagación ayuda a maximizar las ganancias en las plantaciones operacionales o de funcionamiento durante el ciclo actual, sin embargo, se vuelve a recombinar con nuevos genotipos en cada ciclo de mejora, donde se logra restaurar la diversidad genética.

### 5.5. Ganancias genéticas reportadas para diferentes características en especies forestales

Existen diversos reportes sobre ganancia genética para varios caracteres de interés en especies forestales (Cornelius, 1994; Cornelius & Hernández, 1994; Ipinza, 1998; Kumar & Matharoo, 2003; Xiang *et al.* 2003; Rojas *et al.*, 2004; Burdon & Kumar, 2004; Botrel *et al.* 2007; SangUrk *et al.*, 2007; Kumar, 2007; Blada & Popescu, 2008; López *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2008; Rocha *et al.* 2009; Murillo & Badilla, 2009; Verryn *et al.*, 2009; Mesén & Vásquez, 2009; Vallejos *et al.*, 2010).

En Colombia se han reportado ganancias genéticas esperadas, para caracteres como el DAP, altura total y forma del fuste en varias especies nativas: *Alnus jorullensis*; *Cariniana pyriformis*; *Cordia alliodora*; *Genipa americana* y *Tabebuia rosea* (Rodríguez & Nieto, 1999). Recientemente, Espitia *et al.* (2010a y 2010b) reportaron dos trabajos de ganancias genéticas esperadas en el mejoramiento genético de acacia (*Acacia mangium* Willd.) y teca (*Tectona grandis* L.F.) en el departamento de Córdoba (Colombia).

En la Tabla 5.3 se presenta un resumen general sobre los valores de ganancias genéticas reportadas en especies forestales en el mundo y en Colombia.

Mediante la introducción de procedencias o genotipos nuevos, es posible obtener ganancias genéticas adicionales en los programas de mejoramiento forestal. En este sentido, Ipinza (1998), reporta ganancias genéticas en *Eucalyptus globulos* de aproximadamente un 25% en volumen por selección de procedencias mejor adaptadas a las zonas productoras. Mesén (1997) señala que los

ensayos de especies y procedencias de *Pinus spp.*, por ejemplo, han mostrado diferencias en volumen de 430% entre la mejor procedencia de *P. tucunumanii* y la peor procedencia de *P. oocarpa* a los 6,5 de edad. Con *Eucalyptus saligna*, encontró una superioridad de 44% en altura y 40% en diámetro entre la mejor y peor procedencia a los cinco años de edad; en *E. urophylla*, encontró una superioridad de 32% en altura y 43% en DAP entre la mejor y la peor procedencia a los 6,5 años de edad; en *Gmelina arborea* las diferencias fueron de 42% en altura, 22% en DAP y 53% en rectitud del fuste entre la mejor y la peor procedencia a los cuatro años de edad, mientras que en *Acacia mangium* se registraron diferencias de 71% en altura y 43% en dap entre la mejor y la peor procedencia a los tres años de edad. Estos ejemplos ilustran la magnitud de las ganancias que pueden obtenerse, mediante ensayos básicos de especies y procedencias. Estas ganancias aumentan en cada ciclo de mejoramiento.

El establecimiento de huertos semilleros a partir de arboles seleccionados en las mejores procedencias puede generar ganancias de hasta el 50%, que podría aumentar al 75%, una vez que se complete el aclareo genético del huerto. Por su parte, las técnicas de clonación permiten ganancias aun mayores, puesto que en este caso se aprovecha el 100% de la varianza genética, es decir, toda la superioridad genética del progenitor es transmitida íntegramente a los propágulos vegetativos (Mesén, 1997).

En el campo de la resistencia a enfermedades, se ha reportado también un alto control genético en una alta variedad de enfermedades y patógenos en una amplia gama de especies forestales. Arguedas *et al.* (2006) reportan en Costa Rica la existencia de clones de teca no infectados por la roya, evidencia de un enorme potencial para el desarrollo de materiales resistentes al *Olivea tectonae*. La selección de los árboles libres de enfermedades en poblaciones altamente infectadas, puede ser un primer paso efectivo en el desarrollo de variedades resistentes.

Tabla 5.3. Ganancias genéticas (GG) reportadas para varios caracteres en forestales.

Espece	Carácter	GG (%)	Fuente
Varias especies	Altura	10 a 15	Cornelius, 1994
	DAP	>15	
	Volumen	35	
<i>Gmelina arborea</i>	Volumen	15 a 25	Cornelius & Hernández, 1994
<i>Eucalyptus globulos</i>	Volumen	25 a 30	Ipinza, 1998
<i>Pinus radiata</i>	Volumen	5 a 35	Ipinza, 1998
<i>Alnus jorullensis</i> , <i>Cordia alliodora</i> ; <i>Genipa americana</i> y <i>Tabebuia rosea</i>	DAP	2 a 12	Rodríguez & Nieto, 1999
	Altura	1 a 8	Rodríguez & Nieto, 1999
	Forma del fuste	6 a 21	Rodríguez & Nieto, 1999
<i>Gmelina arborea</i>	Volumen	20 a 30	Kumar & Matharoo, 2003
<i>Pinus taeda</i>	Volumen	10 a 40	Xiang <i>et al.</i> , 2003
<i>Gmelina arborea</i>	Altura	106	Rojas <i>et al.</i> , 2004
	DAP	66	
<i>Eucalyptus globulos</i>	Volumen	15 a 20	Burdon & Kumar, 2004
<i>Eucalyptus spp</i>	Volumen	15 a 25	Botrel <i>et al.</i> , 2007
<i>Pinus thunbergii</i>	Altura	11	SangUrk <i>et al.</i> , 2007
	DAP	32	
	Volumen	82	
<i>Gmelina arborea</i>	Altura	18	Kumar, 2007
	DAP	30	

<i>Pinus cembra</i>	Altura	10 a 11	Blada & Popescu, 2008
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	DAP	4,6	López <i>et al.</i> , 2008
	Rectitud fuste	3,8	
<i>Pinus koraiensis</i>	Altura, DAP	10 a 60	Oh <i>et al.</i> , 2008
<i>Schizolobium amazonicum</i>	Altura, DAP, Vol	15 a 65	Rocha <i>et al.</i> , 2009
<i>Tectona grandis</i>	Volumen	20 a 25	Murillo & Badilla, 2009
<i>Vochysia guatemalensis</i>	DAP y altura	10 a 20	Mesén & Vásquez, 2009
<i>Eucalyptus grandis</i>	Volumen	15 a 40	Verryn <i>et al.</i> , 2009
<i>Tectona grandis</i>	Volumen	20 a 35	Vallejos <i>et al.</i> , 2010
	Calidad	5 a 10	
<i>Acacia mangium</i>	DAP	4,4	Espitia <i>et al.</i> , 2010a
	Volumen	61,8	
	Calidad fuste	27,3	
<i>Tectona grandis</i>	DAP	5,5	Espitia <i>et al.</i> , 2010b
	Volumen	41,7	
	Calidad fuste	9,6	
<i>Gmelina arborea</i>	DAP	5,0	Espitia <i>et al.</i> , 2011
	Volumen	36,7	
	Calidad fuste	34,3	

Existen literalmente miles de otros ejemplos de ganancia genética realizada para diferentes rasgos, y algunos ejemplos incluyen capacidad de enraizamiento en segmentos del tallo, la compatibilidad del injerto, resistencia a la sequía, resistencia al frío, el contenido de monoterpenos y producción de semillas. En teoría, casi todos los caracteres exhiben variación genética (si bien son muy bajos), y pueden ser mejorados, si se realiza esfuerzo suficiente integral en la selección, mejoramiento y en los ensayos genéticos para tales caracteres (White *et al.*, 2007).

#### 5.6. Diferencial de selección y ganancia genética esperada en teca en Córdoba (Colombia).

Con el objeto de aplicar los conceptos, las fórmulas e ilustrar de manera práctica y pedagógica la manera de estimar las ganancias genéticas en los principales caracteres de interés forestal, a continuación se utilizan los datos de campo del proceso de selección en el proyecto de investigación: “Selección de árboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea* Roxb) y acacia (*Acacia mangium* Willd) en el departamento de Córdoba”, se presentan de forma resumida los resultados obtenidos en teca. Para conocer los resultados en forma más detallada en acacia y teca, el lector puede consultar los artículos publicados por Espitia *et al.* (2010a y 2010b).

El estudio tuvo como objetivo básico realizar un proceso de selección de árboles plus en plantaciones comerciales de teca, estimar su diferencial de selección y la ganancia genética esperada, con el propósito de iniciar un programa de mejoramiento genético para las condiciones forestales de Córdoba (Colombia).

El estudio se realizó durante los años 2008 y 2009, en seis plantaciones comerciales de teca del departamento de Córdoba (Colombia), de ocho a más de 20 años de edad, las cuales sumaron un total de 5.316 hectáreas (Tabla 5.4).

El proceso de selección de los árboles plus se realizó mediante visita y participación de trabajadores de las plantaciones, utilizando la metodología propuesta por Zobel & Talbert (1984) y adaptada por Vallejos *et al.* (2010). Todos los árboles pre-seleccionados y sancionados en cada lote fueron identificados y georeferenciados, para poder coleccionar su semilla posteriormente. La

selección se basó en la evaluación fenotípica del árbol candidato y sus cuatro mejores vecinos en un radio de 20m, considerando los siguientes caracteres deseables: **a)** árbol sin gambas, **b)** fuste rectilíneo, **c)** pocos nudos, **d)** copa del árbol pequeña y simétrica, **e)** ramas delgadas con ángulo de inserción de 45 a 90°, **f)** dominante en altura, **g)** sanidad del árbol, **h)** diámetro a la altura del pecho (DAP), **i)** altura comercial ( $h_{COM}$ ) y **j)** calidad del fuste (CALI); calificando en forma individual las primeros cuatro trozas de 2,5 m de largo basado en una escala de “1” a “4”, donde un valor de “1” es la mejor calidad posible y un valor de “4” se asigna para trozas sin valor como madera sólida (Murillo & Badilla, 2004a).

El volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ) se estimó utilizando la fórmula de conicidad que incorpora el DAP y la  $h_{COM}$ , así:

$$Vol_{COM} = [(DAP/100)^2 * 0,7854 * h_{COM} * 0,70].$$

Tabla 5.4. Localización (municipios y finca) de las plantaciones donde se realizó la selección de árboles plus de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Municipio	Finca	Área reforestada (Has)	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
PUERTO LIBERTADOR	Reforestadora del Caribe	2.200	07°51'33,2"	075°43'22,4"
CANALETE	Hacienda El Páramo	2.700	08°37'46,3"	076°15'04,3"
CANALETE	Palma Vino	130	08°44'02,3"	076°15'55,3"
SAN ANTERO	Refopal	150	09°18'26,6"	075°50'20,6"
MOMIL	Santo Tomás	6	09°20'11,2"	075°38'14,5"
MONTERIA	Santa Elena	130	08°33'48,9"	075°58'40,7"
Total		5.316		

La CALI del árbol se estimó con el promedio ponderado de la calidad individual de sus primeros cuatro trozas comerciales. El peso ponderado de la troza en el fuste se basó en su aporte al volumen total de los primeros 10 metros de fuste (Murillo y Badilla, 2004a):

- Troza 1 = 40% (0 a 2,5m)
- Troza 2 = 30% (2,51 a 5m)
- Troza 3 = 20% (5,01 a 7,5m)
- Troza 4 = 10% (7,51 a 10m)

El valor de calidad del árbol (CALI) se convierte en una variable cuantitativa que registra valores de “1” a “4”.

Los árboles seleccionados se clasificaron en dos listas A y B. En la lista A, se incluyen los árboles que registraron superioridad tanto en  $Vol_{COM}$  como en CALI, con base en el diferencial de selección:

$$S = [(Y_{\text{árbol seleccionado}} - \bar{Y}_{\text{árboles vecinos}}) / \bar{Y}_{\text{árboles vecinos}}] * 100$$

y en la lista B, cuando superaron solamente en  $Vol_{COM}$  ó en CALI a todos sus mejores vecinos.

La CALI se transformó de la escala original de “1” a “4” a una escala de 1 a 100 para facilitar su comprensión e interpretación, así:

$$CALI_{Invertida} = 100 * \{1 - [(CALI - 1)/3]\}.$$

Con los valores obtenidos de S, se estimó el diferencial de selección promedio por: i) lote o plantación, ii) todos los árboles seleccionados y iii) árboles seleccionados en la lista A (Zobel & Talbert, 1984; Vallejos *et al.*, 2010).

La ganancia genética (GG) se estimó a través de la siguiente ecuación (Zobel & Talbert, 1984; Murillo *et al.*, 2004; Cruz, 2005; Vallejos *et al.*, 2010):

$$GG = S * h^2$$

Donde: “S” es el diferencial de selección y  $h^2$  es la heredabilidad en sentido estrecho promedio reportada:  $h^2_{Diámetro} = 0,20$ ;  $h^2_{Altura} = 0,25$ ;  $h^2_{Volumen} = 0,25$  y  $h^2_{Calidad} = 0,35$  (Cornelius, 1994).

Con la GG obtenida, se construyó un Índice de Selección (IS) que integró de forma ponderada el  $Vol_{COM}$  con la CALI, así (Murillo *et al.*, 2004; Vallejos *et al.*, 2010):

$$IS = [(0,6 * Vol_{COM}/ds) + (0,4 * CALI/ds)]$$

En donde “ds” es la desviación estándar de cada carácter.

Con base en el “IS” se obtuvieron los mejores árboles plus seleccionados, los cuales pueden constituir la población comercial (plus A), mientras que el resto de los árboles (plus B) forman parte únicamente de la población de mejoramiento e investigación. Todos los cálculos en este estudio se realizaron en la hoja electrónica de Excel.

## Resultados

**Árboles plus seleccionados e intensidad de selección.** En la Tabla 5.5, se puede observar que el proceso de selección realizado en las 5.316 hectáreas muestreadas, permitió identificar un total de 46 árboles plus por sus características fenotípicas sobresalientes. Sólo cuatro plantaciones de seis muestreadas permitieron identificar árboles superiores. El número de árboles seleccionados por lote osciló entre 1 y 21. Esta variación se debe fundamentalmente a la variación en tamaño de las plantaciones, las cuales oscilaron entre 6 y 2.700 hectáreas (Tabla 5.4). Otro factor que pudo afectar el número de árboles seleccionados por lote, puede ser la variabilidad y el origen genético de la semilla sexual utilizado para la siembra de las plantaciones objeto de estudio, lo cual se pudo detectar en la visita de selección y eliminación de árboles en las plantaciones, hasta el punto que en dos de ellas (Palma Vino y Santa Elena) no se incluyó ningún árbol superior.

Con base en el proceso de selección anterior, se obtuvo una intensidad de selección por lote que osciló entre 1 por cada 2.200 (Santo Tomás) a 1 por cada 48.333 árboles (Hacienda el Páramo). Esto originó una intensidad de selección promedio de 1 árbol seleccionado por cada 36.193 árboles evaluados (Tabla 5.5), que equivale aproximadamente a 1 árbol por cada 30,5 ha. Esta intensidad de selección promedio resultó ser mayor, que la reportada por Vallejos *et al.* (2010) en GENFORES (Costa Rica) de 1 árbol plus por cada 15.000 a 20.000 individuos, lo cual demuestra el rigor y exigencia en el proceso de selección de los mejores árboles en las plantaciones revisadas en Córdoba.

En la misma Tabla 5.5 se puede observar que de los 46 árboles seleccionados, el 39%, aproximadamente (18 árboles), superó a sus mejores vecinos en los dos criterios, volumen y calidad (Plus A). Mientras que el 61% restante de los árboles seleccionados (28), sólo superaron a sus árboles vecinos en volumen o en calidad (Plus B). La intensidad de selección para los 18

árboles plus A, fue de 1 cada 92.493 árboles. Esta intensidad de selección promedio para este grupo de árboles, resultó ser más exigente que la reportada por Balcorta & Vargas (2004), Murillo & Badilla (2009) y Espitia *et al.* (2010a), quienes reportan intensidades de 1 un árbol plus por cada 1.111 individuos; 1 árbol por cada 15.000 a 20.000 individuos y 1 árbol plus por cada 10.622 a 30.538 individuos, respectivamente. Igualmente, nuestras intensidades de selección fueron superiores a las recomendadas por Zobel & Talbert (1984), quienes sugieren intensidades de selección de 1: < 20 para rodales semilleros y 1: > 1 000 para huertos semilleros. Los valores de intensidad de selección obtenidos en este estudio, se consideran excelentes para programas de mejoramiento genético que se inician, ya que además de permitir identificar un número importante de árboles superiores, también hace posible racionalizar y hacer eficiente el proceso de mejoramiento.

Tabla 5.5. Árboles seleccionados e intensidad de selección por lote en las poblaciones estudiadas de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Municipio	Finca	Árboles plus Seleccionados	Intensidad de Selección (árboles)
PUERTO LIBERTADOR	Reforestadora del Caribe	21	1 de 37.400
CANALETE	Hacienda El Páramo	12	1 de 48.333
CANALETE	Palma Vino	0	0
SAN ANTERO	Refopal	12	1 de 20.625
MOMIL	Santo Tomás	1	1 de 2.200
MONTERIA	Santa Elena	0	0
Total (A+B)		46	1 de 36.193
Plus A		18	1 de 92.493

**Diferencial de selección, ganancia genética esperada e índice de selección.** En la Tabla 5.6 se observa que el diferencial de selección promedio (%) varió con el tipo de lote y los cuatro caracteres evaluados. Aún cuando el número de árboles seleccionado en cada lote fue diferente, el lote que permitió lograr los mayores diferenciales de selección en volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ) fue Refopal (90,47%). Mientras que el mayor diferencial de selección en calidad del fuste (CALI), se registró en Reforestadora del Caribe (25,25%), seguido por el Páramo (24,23%) y Refopal (23,51%). Entre los cuatro caracteres, el mayor diferencial de selección fue registrado en el volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ), seguido por la altura comercial ( $h_{COM}$ ), calidad del fuste (CALI) y diámetro a la altura del pecho (DAP), con valores promedios de 88,99; 55,00; 23,70 y 10,32%, respectivamente. Estos resultados son similares en tendencia y magnitud a los encontrados en *Acacia mangium* por Espitia *et al.* (2010a), e igualmente, son superiores a los reportados en melina por Kumar & Matharoo (2003) y Balcorta & Vargas (2004), quienes reportaron valores de diferencial de selección de 40% para altura total y 40% para volumen comercial respectivamente.

A pesar de lo anterior, se debe tener presente como lo señalan Vallejos *et al.* (2010), que estos valores de diferencial de selección son por lo general más bajos de lo real, debido a que cada árbol plus fue evaluado contra sus mejores cuatro vecinos. Se puede pensar que estos vecinos son competidores muy fuertes, y por tanto, parte de los mejores individuos de la población base ordinaria (sin mejoramiento) que usualmente se obtiene de los viveros comerciales. Por lo tanto, el verdadero diferencial de selección que se presenta en este tipo de programas, usualmente es superior y supera significativamente a la población base.

La misma tendencia en el diferencial de selección, se puede observar en los cuatro caracteres evaluados, cuando sólo se consideran los 18 árboles plus A. Los valores más altos se registraron en: Vol<sub>COM</sub> (139,02%), h<sub>COM</sub> (58,33%), CALI (23,98%) y DAP (22,07). Estos resultados reflejan una superioridad genética potencial de los 18 árboles plus A frente a los 46 seleccionados (A+B), especialmente en Vol<sub>COM</sub> (50,03 puntos más en porcentaje) y DAP (11,75 puntos más en porcentaje). Los valores de diferencial de selección registrados en este estudio, son similares en tendencia y magnitud a los encontrados en *A. mangium* por Espitia *et al.* (2010) y, mayores a los reportados por: Vallejos *et al.* (2010) en teca de 22,88% en volumen y 21,83% en calidad. De manera también superior a lo reportado por Murillo & Badilla (2004b) en teca, con diferencial de selección para el volumen comercial de 24% superior en las mejores familias y de 39% más que los testigos. Así mismo a los valores reportados por Balcorta & Vargas (2004), quienes registraron diferenciales de selección de un 40% para altura y 40% para volumen comercial respectivamente, con respecto a la población original.

Tabla 5.6. Diferencial de selección promedio (en porcentaje) por lote, de los árboles plus de *T. grandis* seleccionados en el departamento de Córdoba, Colombia\*.

LOTE	Árboles	DAP	h <sub>COM</sub>	Vol <sub>COM</sub>	CALI	Índice de Selección (IS)
Canalete (Páramo)	12	7,31	54,79	79,75	24,23	36,90
San Antero (Refopal)	12	16,60	39,69	90,47	23,51	29,41
Momil (Santo Tomás)	1	8,68	53,85	78,37	18,65	30,91
Puerto Libertador (Reforestadora del Caribe)	21	5,84	57,80	73,21	25,25	49,45
Global (A+B)	46	10,32	55,00	88,99	23,70	34,82
Plus A	18	22,07	58,33	139,02	23,98	37,90

\*Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (h<sub>COM</sub>), Volumen comercial (Vol<sub>COM</sub>), Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100 e Índice de Selección (íntegra Volumen Comercial\*0,6 con la calidad\*0,4).

En la Tabla 5.6 se puede observar dos resultados importantes del proceso de selección:

- a) Los mayores índices de selección (IS) se presentaron en la plantación de Reforestadora del Caribe (IS= 49,45) y el Páramo (IS= 36,90), ubicadas en el municipio de Puerto Libertador y Canalete, respectivamente. Esto resultados evidencia que en estas poblaciones se encuentra la mayor cantidad de árboles seleccionados, que reúnen las mejores características en crecimiento, volumen y calidad del fuste.
- b) Existe superioridad en el índice de selección de los 18 árboles plus A (IS= 37,90) sobre los 46 árboles seleccionados (IS= 34,82). Esto se explica porque los individuos plus A, superan tanto en volumen como en calidad a sus mejores vecinos o testigos.

El diferencial de selección para la calidad de las primeros cinco trozas (de 2,5m de largo cada una) presentado en la Tabla 5.7, indica que los árboles plus A superaron a sus mejores vecinos entre 1,46% (primera troza: altura de 2,5 m) y 92% (cuarta troza: altura de 10 m). La anterior ventaja considerando el peso económico de cada troza en porcentaje, se traduce en una diferencia total de 39,37% en calidad a favor de los árboles plus A en comparación con sus mejores



vecinos. Se deduce igualmente, que los árboles plus A y A+B registran, no solo una mucha mayor altura comercial promedio (12,5m ó cinco trozas por árbol) en relación con sus mejores vecinos (8,20 m ó tres trozas productivas por árbol), sino también una mucha mejor calidad. Lo cual representa un alto impacto en el potencial industrial al seleccionar y utilizar (vía clonación) estos árboles superiores en un programa de reforestación comercial.

Tabla 5.7. Diferencial de selección en relación con la calidad de las primeras cinco trozas (2,5m de largo) entre los árboles plus y sus mejores vecinos, de *Tectona grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Altura en el fuste (m)	Árboles Plus (A + B)	Árboles Plus A	Mejores Vecinos	Diferencia con Plus A (%)	Diferencia con Plus A según importancia de troza (%)	Peso económico de la troza (%)
12,5	0,67	0,79	0,00	79,00	3,95	5
10	0,79	0,92	0,00	92,00	13,80	15
7,5	0,93	0,97	0,53	82,11	16,42	20
5,0	1,00	1,00	0,84	18,77	4,69	25
2,5	1,00	1,00	0,99	1,46	0,51	35
Total					39,37	100

Al comparar los valores promedios de los 18 árboles plus A, los 46 árboles seleccionados (A+B) frente al grupo de 184 mejores vecinos utilizados como testigos (Tabla 5.8), se puede detectar un incremento de los árboles plus A de 58,33% y 23,98%, en altura comercial ( $h_{COM}$ ) y calidad del fuste (CALI), respectivamente, frente a los testigos. En la Figura 5.2, se complementa e ilustra la superioridad de los árboles plus A en altura comercial y calidad del fuste por troza frente al total de árboles seleccionados (A+B) y sus mejores vecinos. Los árboles plus A superan una altura comercial promedio de 12,5m, mientras que los mejores vecinos sólo alcanzan 8,20 m. Esto corrobora los excelentes niveles de diferencial de selección relacionados anteriormente.

En la Tabla 5.9 se presentan los resultados en diferencial de selección (S), ganancia genética esperada (GG) e índice de selección (IS) en los cuatro caracteres estudiados, con los 46 árboles plus seleccionados (A+B) y los 18 árboles plus A, utilizando semilla sexual (semilla) o clonándolos directamente (clon). Los resultados del diferencial de selección (S) que se presentan son los mismos que se analizaron en la Tabla 5.6, sólo que esta vez se les adiciona  $\pm$  una desviación estándar al valor promedio. Por lo tanto, aplica la misma interpretación y discusión.

Tabla 5.8. Valores promedios para altura comercial ( $h_{COM}$ ), diferencial de selección de la altura comercial ( $h_{COM}$  %), Calidad del fuste (CALI) y diferencial de selección en calidad del fuste (CALI %), en los árboles plus seleccionados y en los mejores vecinos de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia\*.

Grupo	Árboles	$h_{COM}$ (m)	Diferencial $h_{COM}$ (%)	CALI	Diferencial CALI (%)
Plus A	18	12,54 ( $\pm$ ) 0,59	58,33 ( $\pm$ ) 5,79	0,99 ( $\pm$ ) 0,010	23,98 ( $\pm$ ) 2,22
Plus (A+B)	46	12,24 ( $\pm$ ) 0,36	55,00 ( $\pm$ ) 3,97	0,96 ( $\pm$ ) 0,011	23,70 ( $\pm$ ) 1,48
Testigos (mejores vecinos)	184	8,20 ( $\pm$ ) 0,15		0,78 ( $\pm$ ) 0,099	

\*Altura comercial ( $h_{COM}$ ) y Calidad del fuste (CALI) de 0 a 100.

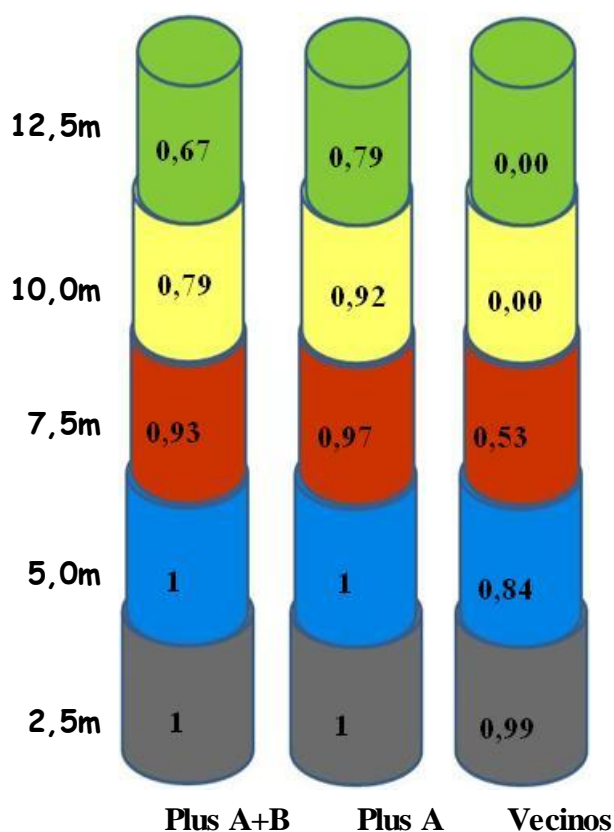


Figura 5.2. Calidad promedio de las primeras cinco trozas (de 2,5m de largo, en una escala de 0 a 1,0) de los árboles plus de teca y sus mejores vecinos, en el Departamento de Córdoba, Colombia.

Entre los cuatro caracteres considerados en el proceso de selección de árboles, los mayores niveles de ganancia genética esperada se obtuvieron en altura comercial ( $h_{COM}$ ) y volumen comercial ( $Vol_{COM}$ ), tanto cuando se emplea la semilla sexual o se toma la decisión de clonar los árboles seleccionados. Las ganancias genéticas para  $h_{COM}$  oscilaron entre 13,75% (A+B, semilla) y 17,50% (A, clon); mientras que para el  $Vol_{COM}$  las ganancias estuvieron entre 22,25% (A+B, semilla) y 41,71% (A, clon), con respecto a los mejores árboles vecinos, considerados como testigos o población base (Tabla 5.9). Los resultados obtenidos son similares o mayores a los reportados por varios autores: a) Espitia *et al.* (2010a), quienes en *A. mangium* reportan ganancias genéticas esperadas en promedio de árboles plus A de 22,24% y 48,57% en altura y volumen comercial, respectivamente; b) Vallejos *et al.* (2010), a su vez relacionan ganancias genéticas esperadas en general entre 20 - 25% en volumen; c) Mesén (2001), quien estimó ganancias genéticas en melina de 17% en altura y 43% en DAP; d) Cornelius & Hernández (1994), en la misma especie, reportaron ganancias genéticas de hasta 12% en rectitud del fuste; e) Kumar & Matharoo (2003), en melina a nivel clonal, encontraron para altura, diámetro basal y diámetro a la

altura del pecho, ganancias de un 18%, 25% y 30%; f) Rojas *et al.* (2004), en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr., en la zona del Pacífico sur de Costa Rica, con ganancias del 23% en volumen. Los resultados de este estudio evidencian el riguroso proceso de selección realizado en las plantaciones evaluadas y permiten vaticinar un importante progreso genético.

Tabla 5.9. Diferencial de selección (S) y ganancia genética (GG) esperada por grupo de árboles seleccionados de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia.

Caracteres	S (%) Plus (A + B)	S (%) Plus A	GG (%) (A + B, semilla)	GG (%) (A, semilla)	GG (%) (A + B, clon)	GG (%) (A, clon)
DAP	10,32 ± 2,13	22,07 ± 9,28	2,06	4,41	2,58	5,52
h <sub>COM</sub>	55,00 ± 3,97	58,33 ± 5,79	13,75	14,58	16,5	17,50
Vol <sub>COM</sub>	88,99 ± 10,37	139,02 ± 20,49	22,25	34,75	26,70	41,71
CALI	23,70 ± 2,31	23,98 ± 2,22	8,29	8,39	9,48	9,59
Índice de Selección (IS)	34,82 ± 2,44	37,90 ± 3,63	12,18	13,26	13,93	15,16

\*Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (h<sub>COM</sub>), Volumen comercial (Vol<sub>COM</sub>) y Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100. \*La calidad se evaluó solamente en 28 árboles plus.

Se observa en la Tabla 5.9, que se puede lograr mayores ganancias genéticas en el programa de mejoramiento empleando solamente los 18 árboles plus A, en vez de utilizar todos los 46 árboles seleccionados (A+B), tanto utilizando su semilla o clonándolos.

Si en el programa de mejoramiento genético de teca se utilizara la semilla sexual de los mejores 18 árboles plus A (A, semilla), se obtendrían ganancias genéticas mayores al uso de la semilla de los 46 árboles seleccionados (A+B, semilla). En DAP se lograría un progreso genético de 2,35% adicional y de 12,5% adicional en el Vol<sub>COM</sub>. Resultados similares en *Acacia mangium* fueron reportados por Espitia *et al.* (2010a).

En general, para los cuatro caracteres de interés incluido en el estudio, el progreso genético esperado es mayor al clonar los 18 árboles plus A (A, clon) que al utilizar su semilla (A, semilla). Los valores de superioridad adicional oscilan entre un 1,11% (DAP) y un 6,96% (Vol<sub>COM</sub>) (Tabla 5.9). De acuerdo con Ipinza (1998) y Murillo & Badilla (2009), esta diferencia en ganancia genética a favor de la clonación de los árboles plus A, se explica porque en la clonación se captura el 100% de la información genética (efectos genéticos aditivos y no aditivos) de los árboles plus A; mientras que cuando se utiliza la semilla sexual originada de polinización abierta, sólo se captura el 50% de la información genética de los árboles plus A seleccionados (madre), ya que no se conoce al progenitor masculino.

La tendencia y superioridad de los valores de ganancia genética esperada determinada en este estudio, son consistentes con los índices de selección (IS) obtenidos, los cuales oscilaron entre 12,18% (A+B semilla) y 15,16% (A, clon) para las cuatro estrategias de mejoramiento posibles (Tabla 5.9). Esto señala que los árboles plus A, cuando son clonados (A, clon), generan la mayor ganancia genética esperada en volumen y calidad (IS = 15,16%), comparado con el uso de la semilla de tales árboles (A, semilla: IS = 13,26%) para obtener nuevas progenies.

Lo anterior implica que se esperaría una respuesta importante a la selección para los cuatro caracteres en estudio. De igual forma, de acuerdo a los valores de diferencial de selección,

ganancia genética esperada y los índices de selección obtenidos, se puede argumentar que la clonación de los 18 árboles plus A seleccionados, producirá una población de árboles con mayores características de crecimiento y superior de calidad del fuste en las siguientes generaciones. Esto permitirá aumentar los rendimientos, la productividad y la calidad de la materia prima, en beneficio directo a los productores de madera y la industria, al producir árboles más homogéneos y menores desperdicios al momento de la cosecha. Este tipo de programas contribuirá en hacer más sostenible, atractivo y equitativo el negocio forestal en el departamento de Córdoba y en Colombia en el largo plazo. Dado que la teca es una de las especies forestales que más se planta para la producción de madera sólida en las regiones tropicales del mundo.

Sí tenemos en cuenta que con incrementos del 4% por conceptos de ganancias genéticas en volumen se cubren los costos de un programa de mejoramiento genético forestal (Ipinza, 1998), los resultados obtenidos en este estudio permiten deducir alta rentabilidad económica en el programa que se adelanta en Córdoba.

De acuerdo con Murillo & Badilla (2009), sí se utiliza la estrategia de clonación de los árboles plus A, en aproximadamente 1 a 2 años se puede iniciar con el establecimiento de plantaciones clonales comerciales con material de alto rendimiento. Mientras que sí se utiliza la estrategia de semilla sexual (familias de medios hermanos), en aproximadamente 6 a 8 años (dependiendo de las condiciones edafológicas y climatológicas de la zona) se tiene semilla mejorada para abastecer la demanda de plantaciones.

A lo anterior, se le debe adicionar que la teca es una especie que se propaga vegetativamente y rebrota fácilmente. Los árboles plus seleccionados pueden ser incluso talados para iniciar su propagación vegetativa y los nuevos rebrotes pueden iniciar su propagación a partir de 6 a 8 semanas después de cortado el árbol. Estos niveles de progreso genético esperado, permiten adicionalmente, vaticinar una reducción de aproximadamente 1 a 2 años en el tiempo para alcanzar dimensiones de cosecha final, si y solo si, se siguen los principios del manejo oportuno de la plantación (Murillo & Badilla, 2009). Lo cual generará un alto impacto y estímulo a la reforestación con teca en el departamento de Córdoba.

Los 18 árboles plus A, por sus características superiores, pueden ser utilizados como progenitores para siembras comerciales (población comercial), utilizando su semilla sexual (aprovechamiento sólo de la varianza genética aditiva) o clonándolos directamente (aprovechamiento de toda la varianza genética) para lograr capturar la mayor ganancia genética potencial (Ipinza, 1998; Mesén, 2001; Murillo & Badilla, 2009; Vallejos *et al.* 2010). Sin embargo, como se observa en la Tabla 5.9, la mayor ganancia genética esperada en altura y volumen comercial, se obtiene con la clonación de los 18 árboles plus A, con valores de 17,50% y 41,71%, respectivamente. Los árboles plus B (28 restantes), no se incorporarán a la población comercial, dado que representan una condición de superioridad solamente en uno de los dos caracteres volumen ó calidad. Por lo tanto, formarán parte de la población de mejoramiento (investigación y desarrollo) y se mantendrán a la espera de su evaluación genética y su utilización en los cruzamientos controlados en el programa de mejoramiento de teca en Córdoba, como lo señalan Murillo & Badilla (2009) y Vallejos *et al.* (2010).

Los resultados encontrados le permiten igualmente al mejorador forestal, de acuerdo a sus recursos económicos y de suelos, definir si incluye en sus ensayos de progenies y de clones todos los 46 árboles seleccionados (A+B) o evalúa en tales pruebas solamente los 18 árboles plus A. Una prueba de progenie o clonal de los 18 árboles, replicada en al menos tres ambientes diferentes, es aceptable en este tipo de ensayos y permitiría, después del raleo genético, contar con sendos huertos semilleros de primera generación, que ofrecerían semilla de excelente calidad genética para nuevas siembras comerciales. De igual forma se contaría con material vegetal para clonar los mejores árboles de las mejores familias, con adaptación específica en cada ambiente. Esta estrategia haría posible que los árboles definitivos se crucen entre sí, forzando su

recombinación genética, la acumulación de alelos favorables y por consiguiente la producción de semilla de calidad genética superior, para continuar con el proceso de mejoramiento (Ipinza, 1998; Mesén, 2001).

Como es de esperarse, es posible que se encuentren buenos genotipos en otras empresas, organizaciones o países. Por lo tanto, este grupo de árboles plus A que se han seleccionado y dado inicio a un programa de mejoramiento genético de teca en Córdoba, como lo señalan Murillo & Badilla (2009), permiten igualmente el desarrollo de modelos cooperativos o de alianza e intercambio de material genético con otras empresas u organizaciones. Esta estrategia junto con la introducción de germoplasma de nuevas procedencias fuera del país, hace posible reducir costos, aumentar variabilidad genética y reducir tasas de consanguinidad en la población de mejoramiento, lo que permitirían seguir obteniendo ganancias genéticas durante varias generaciones.

Los resultados obtenidos sugieren un progreso genético significativo en el mejoramiento de *Tectona grandis* en Córdoba. De acuerdo con Zobel & Talbert (1984) y Xavier *et al.* (2009), este avance integrado con el proceso de silvicultura clonal, con los mejores árboles élites, pueden constituir el complemento ideal de un programa de mejoramiento genético para esta especie. Adicionalmente, hacen prever un aporte importante a la productividad, competitividad y sostenibilidad de la producción forestal en el departamento, de acuerdo a las exigencias de calidad del mercado internacional al cual se pretende llegar. No obstante es necesario corroborar este progreso genético, mediante ensayos genéticos apropiados en varias zonas productoras de Córdoba.

Según Murillo & Badilla (2009), con los resultados de los ensayos de evaluación genética se obtienen los parámetros genéticos de la población de mejoramiento (Varianzas, covarianzas, componentes de varianzas, heredabilidades, correlaciones genéticas, diferencial de selección y ganancias genéticas realizadas, entre otras). Con esta información, por lo general, se procede a eliminar un 30 a 50% de los materiales inferiores. Mientras que el material que registre un rendimiento superior, permanece para conformar la población de progenitores que darán base a la segunda generación de mejoramiento mediante un diseño de cruzamientos controlados. Sus descendencias se evaluarán en ensayos de progenie de segunda generación, que tardarán unos 6 a 8 años en brindar la información genética. Estos ensayos se convierten en Huertos Semilleros de segunda generación o se clonan los mejores individuos, dependiendo de la estrategia de mejoramiento a seguir. Esta segunda generación de mejoramiento, por lo general, se espera obtenga aproximadamente otro 25% adicional en volumen y rendimiento, así como material mucho más homogéneo. De ésta manera continúan obteniéndose nuevas generaciones de mejoramiento cada 8 a 10 años, aportando nuevo material con una ganancia genética esperada de un 20 a un 25%. La organización de las plantaciones clonales en campo puede realizarse a través de dos tipos: a) Lotes monoclonales o b) Lotes de clones mixtos, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada una. En ambos tipos de plantaciones clonales, se deben utilizar no menos de 15 genotipos, con el fin de garantizar una variabilidad genética mínima en campo y reducir los riesgos fitosanitarios (Murillo *et al.*, 2003).

Con base en los resultados de este estudio, se puede concluir lo siguiente:

- a) De los 46 árboles seleccionados, 18 (39%) fueron clasificados como plus A y los 28 (61%) restantes como plus B.
- b) Al seleccionar y clonar los 18 mejores árboles plus A con base en el IS, se espera obtener ganancias genéticas de 5,52%; 17,50%; 41,71% y 9,59%, para los caracteres DAP,  $h_{COM}$ ,  $Vol_{COM}$  y CALL, respectivamente.

- c) Los resultados obtenidos sugieren un progreso genético y económico significativo en el mejoramiento de *Tectona grandis* en Córdoba.
- d) Los 46 árboles plus localizados en el Departamento de Córdoba, constituyen una base genética relativamente pequeña, insuficiente para sustentar un programa de mejoramiento genético a largo plazo con esta especie. Es absolutamente imprescindible realizar esfuerzos por introducir nuevas procedencias y realizar intercambio de germoplasma, con el fin de ampliar la base genética de este programa.
- e) Es necesario comprobar este gran potencial de mejoramiento genético, mediante ensayos genéticos en varias zonas productoras de Córdoba.
- f) Será interesante correlacionar en unos pocos años, la ganancia genética esperada obtenida en esta investigación, con la ganancia genética realizada obtenida en los ensayos genéticos en campo.

## Bibliografía

- ARGUEDAS, M.; MURILLO, O; AYUSO, F y MADRIGAL, O. 2005. Variación en la resistencia de clones de teca (*Tectona grandis* L.f.) ante la infección de la roya (*Olivea tectonae* Rac.) en Costa Rica. Kurú: Revista Forestal 2(6):10 p. [http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista\\_Kuru/anteriores/anterior6/pdf/Articulo%202.pdf](http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/anteriores/anterior6/pdf/Articulo%202.pdf) (Consultado: Ago/15/2011)
- 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. 10(1): 13-19.
- BLADA, I., POPESCU, F. 2008. Diallel crossing in *Pinus cembra*: IV. age trends in genetic parameters and genetic gain for growth and branching traits Ann. For. Res. 51:89-112.
- BOTREL, M.C.G.; MOREIRA DA SILVA, J.R.; TRUGILHO, P.F.; DA SILVA, S.C.; BRUNO RICARDO, B.F. 2007. Ganho genético em propriedades físicas e mecânicas de clones de eucalipto. Science Forestry, Piracicaba. V. 76 (1): 13-19.
- BURDON, R. D.; KUMAR, S. 2004. Forwards versus backwards selection: trade-offs between expected genetic gain and risk avoidance. New Zealand Journal of Forestry Science, Rotorua. V. 34(1): 3-21.
- CORNELIUS, J. 1994. The effectiveness of plus-tree selection for yield. Forest Ecology and Management. No 67: 23-34.
- CORNELIUS, J. Y HERNÁNDEZ, M. 1994. Variación genética en crecimiento y rectitud del fuste en *Gmelina arborea* en Costa Rica. Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales, 10: 9-12.
- CORNELIUS, J. Y UGARTE-GUERRA, J. 2010. Introducción a la genética y domesticación forestal para la agroforestería y silvicultura. Notas de clases. Lima – Perú. Centro Mundial para la Agroforestería (ICRAF). 124p.
- CRUZ, COSME D. 2005. Princípios de Genética Quantitativa. Universidade Federal de Viçosa. Editora UFV. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 394p.
- ESPITIA, M., MURILLO, O., CASTILLO, C. 2011. Progreso esperado en la selección de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba (Colombia. En memorias impresas. ISSN 2248-6674. XLI Congreso Anual de COMALFI (Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal). Universidad del Tolima - Ibagué (Tolima) 21, 22 y 23 de septiembre/2011. 136p.

- ESPITIA, M.; MURILLO, O.; CASTILLO, C. 2010b. Ganancia genética esperada en la selección de teca (*Tectona grandis* L.) en Córdoba (Colombia). Revista Colombia Forestal. Vol.13, Número 2: En impresión.
- ESPITIA, M.; MURILLO, O.; CASTILLO, C.; ARAMÉNDIZ, H.; PATERNINA, N. 2010a. Ganancia genética esperada en la selección de acacia (*Acacia mangium* WILLD) en Córdoba (Colombia). Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. Vol.13, Número 2: En impresión.
- IPINZA, R. 1998. Mejoramiento genético forestal. Serie Técnica N°42, Programa CONIF-Ministerio de Agricultura sobre investigaciones en semillas de especies forestales nativas. INSEFOR. Santa fe de Bogotá, Colombia. 162p.
- KUMAR A. 2007. Growth Performance and Variability in Different Clones of *Gmelina arborea* (ROXB.) *Silvae Genetica* 56 (1): 32-36.
- KUMAR, A Y MATHAROO, A.K. 2003. Genetic improvement of *Gmelina arborea* in India. In: Recent Advances with *Gmelina arborea* (eds. W. S. Dvorak, G. R. Hodge, W. C. Woodbridge and J. L. Romero). North Carolina State University. Raleigh, NC. US. CAMCORE. 221p.
- LÓPEZ, C.; SALTO, C.; EWENS, M. 2008. Variación genética del diámetro y de la rectitud de fuste de familias de polinización abierta de *Eucalyptus tereticornis* Smith. Revista de Ciencias Forestales – Quebracho N° 16: 62-68.
- MESEN, F. 1997. Potencial del mejoramiento genético en la silvicultura. *Agronomía Costarricense* 21(1): 49-53.
- MESÉN, F. 2001. Introducción al mejoramiento genético forestal. En: Identificación, selección y manejo de fuentes semilleras. Serie Técnica / No. 32. Convenio CONIF, INSEFOR y MADR. Bogotá, septiembre. ISSN 0121-0300. 118p.
- MESÉN, F. Y VÁSQUEZ, W. 2009. Variación genética de procedencias y familias de *Vochysia guatemalensis* a los 18 años de edad en Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2): 157-170.
- MURILLO, O Y BADILLA, Y. 2004a. Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica. 50 p.
- MURILLO, O Y BADILLA, Y. 2009. Reproducción clonal de árboles. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, ITCR. Cartago, Costa Rica. 45 p.
- MURILLO, O y BADILLA, Y. 2004b. Breeding teak in Costa Rica. In: IUFRO Meeting. Forest Genetics and Genomics. 1 – 5 de noviembre. Charleston, South Carolina, USA. [www.ncsu.edu/feop/iufro\\_genetics2004/proceedings.pdf](http://www.ncsu.edu/feop/iufro_genetics2004/proceedings.pdf)
- MURILLO, O. Y BADILLA, Y. 2005. ¿Qué es mejoramiento genético forestal?. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 14 p.
- MURILLO, O; OBANDO, G.; BADILLA, Y. & ARAYA, E. 2004. GENFORES, a Costa Rican tree improvement and gene conservation cooperative. En: IUFRO Meeting. Forest Genetics and Genomics. 1 – 5 de noviembre. Charleston, South Carolina, USA.
- MURILLO, O; ROJAS, J.L; BADILLA, Y. 2003. 2ed. Reforestación Clonal. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica 36 p.
- OH, C.Y.; HAN, S.U.; MM, C. S.; KANG, K. S.; LEE, B. S. 2008. Genetic gain and diversity in a clonal seed orchard of *Pinus Koraiensis* under various thinning intensities. *Korean Journal of Breeding Science*. Vol. 40(No.3): 263-268.
- ROCHA, R.B.; VIEIRA, A.H.; BENTES, M.D.; BRUM, L.M. 2009. Avaliação genética de procedências de bandarra (*Schizolobium amazonicum*) utilizando REML/BLUP (Máxima

verossimilhança restrita/Melhor predição linear não viciada. Sci. For., Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 351-358.

RODRÍGUEZ, J. Y NIETO, V. 1999. Investigación en semillas forestales nativas. Serie Técnica No. 43. ISSN 0121-0300. Programa de Investigación en Semillas Forestales Nativas – INSEFOR. Convenio CONIF – Ministerio de Agricultura. 89p

ROJAS, F.; ARIAS, D.; MOYA, R.; MEZA, A.; MURILLO, O.; ARGUEDAS, M. 2004. Manual para productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, 314p.

SANGURK, H.; KYUSUK, K.; BYOUNG HWAN, C. Y CHANGSOO, K. 2007. Realized genetic gains and heritabilities for height, DBH and volume growth in open-pollinated progenies of *Pinus thunbergii*. Korean Journal of Breeding Science 2007 Vol. 39 No. 1 pp. 15-19.

VALLEJOS, JONATHAN; BADILLA, YORLENY; PICADO, FÉLIX Y MURILLO, OLMAN. 2010. Selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. Agronomía Costarricense. Vol.33, Número 1: En impresión.

VERRYN, S.D.; SNEDDEN, C.L.; EATWELL, K.A. 2009. A comparison of deterministically predicted genetic gains with those realized in a South African *Eucalyptus grandis* breeding program. Journal of Forest Science, Menlo Park, v.71, n.2: 141-146.

WHITE, T.L.; ADAMS, T.; NEALE, D.B. 2007. Tree improvement programs-structure, concepts and importance. In: Forest Genetics. CABI Publishing. ISBN 9780851990835. London, UK. 702p.

XAVIER, ALOISIO; WENDLING, IVAR; DA SILVA, ROGÉRIO. 2009. Silvicultura Clonal. Princípios e Técnicas. Editorial Universidad Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 272 p.

XIANG, B.; LI, B.; MCKEAND, S. 2003. Genetic gain and selection efficiency of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in three geographic regions. Forest Science, Bethesda. V.49(2): 196-208.

ZOBEL, B Y TALBERT, J. 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley & Sons. New York, USA. 510 p.

ZOBEL, B. Y TALBERT, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de arboles forestales. Ed. Limusa. México D.F. 545 p.



## Capítulo 6. Propagación de los árboles seleccionados

### 6.1. Definiciones y conceptos generales

Una de las características fundamentales de los organismos vivos, es la capacidad de reproducción. Esta propiedad, la poseen todos los organismos individuales y a nivel de poblaciones. En la implementación de un programa de mejoramiento genético y siembra comercial de cualquier especie, es importante conocer el modo de reproducción y la biología reproductiva, de tal manera que ello debe preceder cualquier consideración sobre los métodos de mejoramiento.

En el mejoramiento genético de plantas y el uso de sus productos, el éxito depende del conocimiento de los procesos reproductivos. Estas técnicas de mejoramiento deben contemplar muchos aspectos de la reproducción, entre ellos tenemos:

- a) Reproducción sexual, asexual o la combinación de las dos
- b) Estructura floral
- c) Cantidad de transferencia o flujo de polen
- d) Grado y significado de la autoincompatibilidad, y
- e) Efecto de la endogamia sobre el vigor, entre otros.

La importancia de la reproducción es obvia, ya que es el requisito para perpetuar la especie o una población a través del tiempo y es el único medio de multiplicación, por el aumento numérico de individuos y colonización de nuevos territorios. La reproducción de las plantas, se puede estudiar desde dos puntos de vista: a) **reproducción sexual ó biológica** y b) **reproducción asexual ó vegetativa**.

**La reproducción sexual ó biológica** implica la formación (gametogénesis) y posterior unión de gametos masculinos y femeninos, a través de un proceso conocido como fecundación; generando variaciones hereditarias en la especie, las cuales constituyen la materia prima necesaria para la respuesta o adaptación de las especies a las condiciones ambientales heterogénea o cambiante.

**La reproducción asexual ó vegetativa** es el proceso mediante el cual se multiplica o propaga un solo individuo mediante algún proceso de gemación y ello garantiza que todos los individuos resultantes son genéticamente idénticos (clon) y se minimiza el origen de tipos recombinantes. Ello se debe a que en este proceso no participan las células reproductivas, no hay unión de gametos masculinos y femeninos, no hay reducción cromosómica o meiosis, ocurriendo sólo la mitosis, es decir la constitución genética y cualidades hereditarias son idénticas en todos los descendientes.

La reproducción asexual se lleva a cabo en plantas cuya reproducción es exclusivamente a través de partes vegetativas, sin embargo, en este grupo se encuentran plantas que poseen órganos sexuales funcionales con capacidad de reproducirse sexualmente, pero en la práctica lo hacen asexualmente por medio de: estolones, acodos, bulbos, rizomas, tubérculos, estacas, esquejes, raíces, tallos, hijuelos, injertos, hojas o por medios artificiales de reproducción como el cultivo de tejidos etc, este es el caso de muchas especies forestales.

En este tipo de reproducción (asexual) bajo condiciones normales, hay que destacar lo siguiente: **a)** No se produce reducción cromosómica, recombinación y variabilidad genética, **b)** Las células se reproducen por mitosis, **c)** Las células resultantes bajo condiciones normales poseen igual genoma y genotipo que la célula madre y **d)** todos los individuos resultantes poseen cualidades hereditarias iguales a los del individuo de donde provienen.

La reproducción vegetativa o asexual se agrupa en propagación vegetativa y apomixis. La reproducción asexual por **apomixis**, es un sistema de reproducción, en la cual los propágulos son estructuras desarrolladas dentro de los óvulos de los ovarios y morfológicamente forman las semillas o frutos, pero sin fecundación. La meiosis característica de la reproducción sexual no ocurre o no es funcional. La oosfera contiene el número de cromosomas somáticos maternos iguales, no ocurre fusión de gametos sexuales durante la fertilización y el desarrollo del embrión es independiente, generando por lo tanto, una planta idéntica a la planta madre. Se encuentra reportada en 30 a 40 familias y en aproximadamente 300 especies de las angiospermas (Araméndiz *et al.*, 2010).

## 1 Entre las **ventajas de la reproducción asexual o vegetativa**, se tienen:

- a) Las plantas originadas de un mismo individuo (clon) son genéticamente idénticas, lo que significa que un genotipo seleccionado o mejorado se puede multiplicar, propagar y conservar uniforme todos sus caracteres, aún cuando sea heterocigoto.
- b) Los clones de igual constitución genética, pueden registrar variación por efecto del ambiente, pero cuando ocurre mutación, variación somaclonal o sucede un cruzamiento favorable, este se puede seleccionar y mantener como un nuevo genotipo de interés.
- c) En cruzamientos o manipulaciones de otro tipo, cuando se generan plantas estériles (no producen semillas), éstas se pueden mantener a través de reproducción vegetativa.
- d) Obtención de cosechas en un menor período de tiempo, en comparación de lo que demanda el uso de la semilla sexual.
- e) La falta de producción de semilla, puede proporcionar mayor valor a la parte vegetativa útil de la planta, por una mayor concentración de azúcares, aminoácidos, proteínas, aceites, fibras, etc., antes de la floración.
- f) La estabilidad genética de los clones se comprueba precisamente por la persistencia de los caracteres genéticos deseables en las plantas propagadas asexualmente.
- g) En especies dioicas no sería posible su reproducción de no ser vegetativamente. En especies forestales abundan los ejemplos de especies de importancia económica cuyo sistema reproductivo es dioico.

Entre las **desventajas de la reproducción asexual**, se relacionan:

- a) Alta uniformidad genética y fenotípica. Ello genera mayor riesgo potencial a enfermedades, plagas y variaciones del clima. De igual forma, no se puede esperar seleccionar nuevos tipos dentro de un clon, mientras no ocurran mutaciones.
- b) Origen de variación somaclonal. La pérdida de la identidad genética por efecto de las mutaciones nucleares y/o citoplasmáticas a causa del estrés de las células en el cultivo de explantes, puede ocasionar variaciones genéticas aneuploides (variación en unidades de cromosomas) y euploides (variación en juegos de cromosomas o nivel de ploidía) que comprometen la calidad de la semilla.
- c) Requiere mayor cuidado en el empaque y transporte del material vegetal. El volumen que implica el transporte de material asexual es mucho mayor que la semilla sexual, lo cual genera más cuidado en el empaque y transporte en algunas circunstancias.
- d) Mayor riesgo en la diseminación de enfermedades y plagas. Existe el riesgo de introducir enfermedades que solo se transmiten a través de las partes vegetativas y que raramente se transmiten por semilla (Araméndiz *et al.*, 2010).
- e) Mayores dificultades para la introducción, intercambio y comercio de material genético entre países, debido a mayores restricciones fitosanitarias y rigurosidad en los Análisis de Riesgo de Plagas (ARP) en los sistemas de control de cada país.

Mayor discusión sobre ventajas y desventajas de la propagación vegetativa y sexual en especies forestales, puede encontrarse en el trabajo de Murillo *et al.* (2001).

Según Cornelius & Ugarte-Guerra (2010), los aspectos claves con implicaciones más importantes para el mejoramiento genético dentro de la genética y biología reproductiva de los árboles tropicales, son: **a) Sus sistemas sexuales y sistemas de apareamiento**, especialmente la alta incidencia de **autoincompatibilidad**; **b) Su alta capacidad para mantener el flujo de alelos entre poblaciones** y **c) Su alta variabilidad genética**.

a). El **sistema sexual** se refiere a la distribución de los sexos en los árboles. Los árboles tropicales exhiben cuatro tipos principales, a saber:

- 1) **Dioecia o Dioicismo.** Este fenómeno se presenta en especies que tienen sus flores masculinas y flores femeninas separadas en árboles diferentes. A estos árboles en la literatura también se les conoce como **dioicos**, en razón a que tienen los **dos sexos separados en individuos diferentes**.
- 2) **Monoecia o Monoicismo.** Se presenta en aquellas especies donde las flores masculinas y flores femeninas, se encuentran en el mismo árbol, pero en estructuras separadas. A estos árboles en la literatura también se les conoce como **Monoicos**, en razón a que tienen los **dos sexos en estructuras independientes, pero en un mismo individuo**.
- 3) **Hermafroditismo o Monoclino.** Se presenta en aquellas especies donde las flores son perfectas, o sea presentan los dos sexos masculino (androceo) y femenino (gineceo) en la misma flor.
- 4) **Bisexualidad.** Se presenta en aquellas especies donde los árboles exhiben monoecia y hermafroditismo. Desde el punto de vista genético el resultado es casi idéntico.

En el caso de los árboles tropicales, Cornelius & Ugarte-Guerra (2010) señalan que el hermafroditismo es la condición más común (60-70% de las especies), seguido por la dioecia (alrededor de 20%) y la monoecia (un 10-15%).

b). El **sistema de apareamiento** en el contexto de los árboles, se refiere principalmente a la proporción de descendencias que son productos de cruces (polinización cruzada) entre árboles diferentes (alogamia), en contraste con los autocruces (autofecundación o autogamia). El parámetro más utilizado para describir el sistema de apareamiento es **t**, la tasa de alogamia. La estimación de **t** se hace normalmente utilizando marcadores moleculares. El valor de **t** varía entre 0 y 1; un valor de **t = 1**, indica alogamia total (100% de polinización cruzada), mientras que un valor de **t = 0**, indica autogamia total (100% autofecundación). Típicamente, en los árboles tropicales el valor de **t es superior a 0,85**.

c). Otra fuerza importante que favorece la alogamia o la polinización cruzada natural es la **autoincompatibilidad**, que es el proceso mediante el cual los árboles de una especie no pueden autofertilizarse o autofecundarse, sino que el polen para la fecundación de su ovario debe provenir de otro árbol con un genotipo diferente. La incompatibilidad ocurre a nivel genotípico, es decir, un árbol vecino con el mismo genotipo tendría exactamente la misma repercusión genética que la autofecundación. Entre las características más importantes de este fenómeno tenemos (Cornelius & Ugarte-Guerra, 2010):

- ✓ Los experimentos de polinización controlada han demostrado que la gran mayoría (alrededor de 80%) de las especies de árboles tropicales son **autoincompatibles**.
- ✓ La autoincompatibilidad implica **altos niveles en la tasa de alogamia (t)**, en las especies tropicales.
- ✓ La autoincompatibilidad es controlada genéticamente.
- ✓ Existen diferentes grados de incompatibilidad. Algunos árboles individuales de "especies autoincompatibles" pueden mostrar cierto grado de compatibilidad.
- ✓ La autoincompatibilidad, así como la dioecia, tiene importantes implicaciones:
  - i. Existe un constante movimiento e intercambio de polen (y por lo tanto de alelos) entre árboles de la misma especie, lo cual promueve la heterocigosidad.

- ii. Es muy difícil o imposible mejorar genéticamente la mayoría de los árboles utilizando las técnicas de desarrollo de líneas uniformes, e hibridación entre líneas que se han usado en algunos cultivos, como el maíz.
  - iii. Debido a su alta heterocigosidad, las especies forestales frecuentemente tienen una **carga genética** alta de alelos nocivos o deletéreos. Por ser recesivos, estos alelos nocivos, normalmente se mantienen escondidos en individuos heterocigotes (portadores) y no se manifiestan. Sin embargo, cuando hay apareamiento entre parientes cercanos o entre individuos portadores, o también cuando la tasa de consanguinidad en la población es muy alta, aumenta el riesgo de expresión mediante individuos homocigotos para estos alelos deletéreos. En este caso estos alelos recesivos deletéreos pueden provocar problemas como el albinismo, un crecimiento raquítrico o baja producción de semilla, estos efectos se les conoce como depresión endogámica.
- d). Algunas especies no son autoincompatibles, por ejemplo especies de *Pinus*, *Eucalyptus* y algunas de las especies tropicales como *Ceiba pentandra*. Estas especies normalmente tienen otros mecanismos para evitar la autofertilización o la autofecundación (precigóticos), por ejemplo la **dicogamia** o asincronía floral (la dispersión del polen y la maduración de los estigmas del mismo árbol no coinciden en el tiempo). Así también se conocen mecanismos postcigóticos, que actúan y eliminan al individuo posterior a la fecundación y formación de la semilla, donde el albinismo es el más conocido. En estas especies también las progenies derivadas de autocruces (autofecundación) o incluso cruces entre parientes cercanos frecuentemente padecen de **depresión endogámica** (reducción del vigor, la fertilidad y aparición de características indeseables, como consecuencia de la expresión de genes deletéreos en estado homocigoto).
- e). *Leucaena leucocephala* por ser **autocompatible**, pertenece al grupo pequeño que puede autofecundarse.
- f). El **flujo de alelos** en los árboles tropicales se define y caracteriza por lo siguiente:
- ✓ El **flujo de alelos**, en general se define como “**flujo génico**”, lo cual corresponde tanto al **flujo polínico como a la dispersión de las semillas y frutos**. Ambos procesos entran en lo que se define como “**migración**” (flujo génico), lo que es considerado como una de las cuatro (4) principales fuerzas evolutivas. El flujo génico se define como el intercambio de alelos entre poblaciones. Ocurre a través de dos mecanismos principales: la dispersión de semillas-frutos y la dispersión de polen.
  - ✓ En un 90% (por lo menos) de los casos, el polen de los árboles tropicales normalmente es dispersado por insectos y otros animales, como los murciélagos. La dispersión por viento es poco común en las especies tropicales (los pinos tropicales y el aliso (*Alnus jorullensis*) representan una excepción importante).
    - i. La mayor parte del polen es transportado hacia árboles relativamente cercanos. Sin embargo, los animales dispersores de polen son capaces de viajar grandes distancias y efectuar el movimiento de larga distancia del polen.
    - ii. Por lo tanto, muchos grupos de árboles o árboles individuales que están aislados espacialmente **no necesariamente están aislados en términos reproductivos**. Intercambian alelos con otras poblaciones y así estas poblaciones “aisladas” se mantienen genéticamente variables mientras se encuentren en contacto de apareamiento.
  - ✓ La semilla y/o los frutos también pueden ser transportados por largas distancias, aunque la dispersión de polen contribuye más al flujo alélico.
  - ✓ Aunque una pequeña proporción del polen y la semilla/fruto puede viajar largas distancias, la mayor parte permanece cerca del árbol semillero. Como consecuencia, dentro de las poblaciones naturales ocurre con frecuencia la existencia de una **estructura o patrón genético espacial**, donde por lo general, el grado de parentesco entre los árboles es

proporcional a la distancia física entre ellos. Como consecuencia, los árboles vecinos pueden ser primos, hermanos, padres e hijos, etc.

**g).** La **variabilidad genética** es un parámetro poblacional. Se puede considerar como el fenómeno mediante el cual una población está constituida por individuos con genotipos diferentes que se expresa en un amplio rango de variación de características biológicas. La variabilidad genética está determinada por los mecanismos de reproducción sexual o biología reproductiva, la autoincompatibilidad, el flujo génico, el tamaño efectivo de la población, la tasa de mutación y la presión de la selección natural. La variabilidad genética es una condición necesaria en las poblaciones forestales para que el mejorador pueda realizar la selección y obtener progresos significativos en las características de interés. Entre las características principales de la variabilidad genética, tenemos:

- ✓ La **variabilidad genética** se puede determinar de dos maneras principales. En términos de variación con marcadores moleculares y segundo, en términos de variación morfológica. Al hablar de variación morfológica se entiende como la expresión de caracteres de forma, pero esta variación podría verse también en constantes fisiológicas, de concentración de determinados compuestos, etc. Una manera de incluir a todos estos otros caracteres que en general tienen variación continua y son poligénicos es hablar de “caracteres métricos” o “morfométricos”.
- ✓ La variación genética a nivel molecular se expresa con parámetros genéticos como **P** (el porcentaje de loci polimórficos), **A** (el número de alelos por locus y su frecuencia en la población, o riqueza alélica) y **He** (diversidad génica o heterocigosidad esperada).
- ✓ Las especies de árboles tropicales por lo general exhiben altos niveles de variación genética molecular.
- ✓ Esta variación genética normalmente demuestra una estructura espacial y puede ser separada en componentes interpoblacionales e intrapoblacionales.
- ✓ Normalmente, en los árboles tropicales la mayor parte (un 85-90%) de la variación se concentra a nivel intrapoblacional.
- ✓ La alta variabilidad intrapoblacional se debe en gran medida a la autoincompatibilidad y a otros mecanismos que impiden la autofertilización y promueven la heterocigosidad.
- ✓ La poca variabilidad entre poblaciones se explica principalmente cuando ocurre un importante flujo alélico, el cual ejerce un efecto homogenizador.
- ✓ Cuando el flujo alélico es inexistente o casi inexistente (ej. poblaciones muy aisladas, especies con rangos disyuntivos de distribución), normalmente habrá mayores diferencias entre poblaciones. Pudiendo existir entonces un aislamiento reproductivo.
- ✓ La variabilidad genética se manifiesta también en la morfología de los árboles, es decir, en diversas características como tasa de crecimiento, densidad de su madera, fenología, rectitud del fuste, etc. En general, es de esperar que cualquier característica que demuestre variación fenotípica también demostrará variación genotípica.
- ✓ Muchas características morfológicas están controladas no por un sólo o dos genes (como en la genética clásica de Mendel), sino por decenas de genes. Como consecuencia, para una determinada característica no son solo tres combinaciones posibles (como es el caso con un solo gen con dos alelos), sino centenares. Además, muchas características de este tipo – **las características cuantitativas** – son afectadas también por el ambiente. Debido a estos dos factores, estas características demuestran una variación continua, en lugar de agruparse en clases discretas.
- ✓ En general, la variación genética morfológica se expresa utilizando parámetros cuantitativos como las covarianzas, varianzas, componentes de varianzas genotípicas, correlaciones y la heredabilidad, entre otros.

- ✓ Normalmente, la distribución de la variación genética morfológica entre y dentro de poblaciones es semejante a la distribución de variación genética molecular, es decir hay más variación dentro de las poblaciones que entre ellas.
- ✓ La variación genética morfológica inter e intrapoblacional se mide utilizando ensayos de campo, en los cuales las descendencias (hijos) de árboles de diferentes poblaciones o de la misma población, se comparan estadísticamente en diseños experimentales en el mismo lugar (ej. Ensayos de procedencias, prueba de progenie, etc.).
- ✓ Es normal que las descendencias (hijos) de dos árboles diferentes de la misma población difieran hasta en un 100% en su tasa de crecimiento y en otras características, aun cuando crezcan en las mismas condiciones de suelo y clima.
- ✓ Cuando una especie ocupa un amplio rango geográfico, es normal encontrar variación genética morfológica muy grande entre poblaciones de diferentes regiones, especialmente si el flujo alélico es inexistente o casi inexistente.
- ✓ Estas diferencias se deben a los procesos de adaptación al ambiente local, es decir a la **selección natural**. Pueden desarrollarse también en el caso de gradientes altitudinales, tales como ocurren entre la selva baja y la selva alta del Perú.
- ✓ Hay mucha confusión en cuanto a la terminología empleada para describir la variación genotípica. Es importante distinguir conceptos como procedencia, origen, ecotipo, población, raza y variedad.
- ✓ La variación genética es la materia prima del mejoramiento genético. Como la variación genética tiene una estructura espacial, el mejoramiento genético funciona aprovechando los diferentes niveles de variación genética, particularmente la variación genética entre y dentro de poblaciones (Cornelius & Ugarte-Guerra, 2010).

La mayoría de las especies forestales comerciales se reproducen tanto por semilla sexual como por medios vegetativos. Con el objeto de acortar el proceso y hacer más ágil la entrega de los productos de los programas de mejoramiento genético forestal, se ha desarrollado intensivamente el sistema de reproducción y multiplicación de los genotipos superiores por vías vegetativas, a través de la macropropagación (rebrotos, estacas, miniestaquillas, injertos, etc) y la micropropagación (cultivo de tejidos, anteras, yemas, embriogénesis somática, etc).

Aunque la plantación comercial de especies forestales puede hacerse por varias formas: por reproducción sexual (utilizando semillas) o por reproducción asexual o vegetativa (a través de estaquillas enraizadas, cultivo de tejidos e injertos), la silvicultura intensiva y de precisión que se impone en el mundo moderno es la basada en la reproducción asexual o vegetativa, por sus ventajas y logros espectaculares obtenidos.

La propagación vegetativa abarca una amplia gama de técnicas que sirven para una multiplicación rápida de genotipos. Ello ha sido útil para especies que producen pocas semillas o semillas recalcitrantes y para multiplicar determinados genotipos en un plazo corto. Aunque se ha utilizado un gran número de especies arbóreas para la investigación sobre la micropropagación en los países en desarrollo, la mayor parte del trabajo registrado (94%) se encuentra todavía en la fase de laboratorio, mientras una proporción relativamente pequeña (5%) ha llegado a la fase de ensayo sobre el terreno. Menos del 1% de las actividades de micropropagación registradas en los países en desarrollo ha alcanzado la fase de la aplicación comercial (FAO, 2010c).

Gran cantidad de aportes sobre adaptación de técnicas de propagación vegetativa se han realizado en las universidades costarricenses (Badilla *et al.*, 2000; Murillo *et al.*, 2003) y principalmente en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en la década de los 90. La mayor parte de esta experiencia se condensa en los trabajos de Mesén *et al.* (1992), Mesén y Trejos (1998), Nuñez (1997), y culmina en 1998 con un manual de "Enraizamiento de estacas Juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación" (Mesén, 1998). A partir de la última década, el modelo de mejoramiento genético cooperativo de vinculación universidad - empresa (GENFORES en Costa Rica y Colombia), genera las condiciones para un acelerado desarrollo y evolución de los sistemas de propagación

vegetativa forestal, que logran alcanzar escala comercial a un costo cada vez menor (Murillo *et al.*, 2001; Murillo *et al.*, 2003; Murillo & Badilla, 2004; Murillo, 2006; Badilla & Murillo, 2009; Murillo, 2010).

## 6.2. Importancia de la multiplicación vegetativa del árbol plus

La propagación y multiplicación vegetativa de cualquier árbol plus es importante en los programas de mejoramiento, en razón a que a través de este proceso se logra **capturar el 100% de la constitución genética del árbol seleccionado** (efectos genéticos aditivos y no aditivos). Por tanto, los resultados esperados a la hora de su multiplicación vegetativa en forma masiva (clonación), se espera que repita la superioridad de las características fenotípicas del árbol seleccionado, esto a su vez permite obtener plantaciones de alta calidad y productividad. Mientras que cuando se continúa el mejoramiento genético utilizando la semilla sexual del árbol plus es la madre lo único que conocemos, en razón a que la semilla es originada de polinización abierta (polinización cruzada natural). Cada planta que se obtenga producto de una semilla de ese árbol plus madre, permitirá **capturar solamente un 50%** de sus cualidades, ya que no se conoce al progenitor masculino. Por ello la progenie originada de la semilla sexual de un árbol seleccionado, corresponderá a una familia de hermanos medios que serán de constitución genética variable, dado que sólo tienen en común a la madre, pero sus progenitores masculinos son genéticamente diferentes. Esto conllevará a que no se repita, o se repita en bajo porcentaje, la superioridad del árbol plus (madre) seleccionado cuando se siembre en campo su progenie (Murillo *et al.* 2003).

Por lo anterior, el proceso de clonación de los árboles plus A seleccionados en un programa de mejoramiento, producirá una población comercial de árboles con mayores ganancias genéticas en las principales características de crecimiento y calidad del fuste en las siguientes generaciones. Esto permitirá aumentar los rendimientos, la productividad y la calidad de la materia prima, en beneficio directo de los productores de madera y la industria, al producir árboles más homogéneos y de menores desperdicios al momento de la cosecha y procesamiento de su madera. Es esta técnica, la que hoy se impone en el mundo en combinación con la silvicultura intensiva y de precisión, lo cual permite que este tipo de programas contribuya en hacer más sostenible, atractivo y equitativo el negocio forestal en el mundo en el largo plazo. Ello es más importante si tenemos en cuenta que existen diferentes estrategias de clonación de los árboles adultos en la mayoría de las especies forestales que más se plantan para la producción de madera sólida en el mundo.

La reforestación clonal es considerada el complemento ideal de un programa de mejoramiento genético forestal (Zobel y Talbert 1984). La propagación masiva del material seleccionado permite establecer parcelas monoclonales perfectamente idénticas, con un rendimiento superior al que se alcanzaría si se utiliza la semilla (progenie) de los mismos árboles seleccionados. La uniformidad de la plantación forestal implica ya una ganancia en cuanto al manejo (raleos sistemáticos) y aprovechamiento (fustes casi idénticos en dimensiones y rectitud) (Murillo *et al.*, 2003). Sin duda la experiencia clonal más extensa con especies forestales se ha desarrollado en los países asiáticos y en Brasil (Monteuuis *et al.*, 1995; Mascarehas & Muralidharan, 1993; Xavier *et al.*, 2009).

Existen muchos ejemplos para ilustrar el importante aporte en la productividad y competitividad de la propagación y multiplicación vegetativa de los mejores clones en los programas de mejoramiento en el mundo. Por ejemplo, el desarrollo de la silvicultura clonal en zonas tropicales se reporta a escala comercial en plantaciones de *Eucalyptus*, a partir de los años 70, en proyectos desarrollados en el Congo y en Brazil (Zobel, 1993). Los resultados espectaculares alcanzados por la empresa brasileña Aracruz Florestal, quienes lograron aumentar de un promedio de 33 m<sup>3</sup>/ha/año a poco más de 70 m<sup>3</sup>/ha/año, influyeron definitivamente en la concepción de una nueva silvicultura comercial (Zobel *et al.*, 1987). Varias compañías brasileñas y otras compañías asentadas en América Latina, como Cartón de Colombia, logran también ingresar poco después en el selecto grupo de organizaciones que incorporan los beneficios de la reforestación clonal a escala comercial. Con el apoyo técnico de la Cooperativa de Mejoramiento Genético para especies coníferas de México y Centro América (CAMCORE, con sede en la Universidad Estatal de Carolina del Norte, EUA), un grupo de sus empresas asociadas incorpora también la reforestación clonal en sus programas de mejoramiento genético (CAMCORE, 1999).

Debido al auge que tomó la reforestación clonal, surgieron inquietudes sobre posibles criterios técnicos y regulaciones mínimas tales como, el número mínimo de clones a utilizar en reforestación comercial, el tamaño máximo de los bloques monoclonales, posibilidad de plantar solo

los árboles de la cosecha, como manejar problemas fitosanitarios y el posible manejo de programas de conservación genética, entre los más importantes. Varios congresos internacionales sobre propagación vegetativa de especies forestales y sus aplicaciones fueron realizados en diversos países a partir de 1973 (Kleinschmit *et al.*, 1993). Pero fue hasta 1993 que un grupo de expertos logró publicar el primer libro en dos volúmenes especializado en la materia (Clonal Forestry I y II), donde se compila un gran bagaje de experiencia y estado del conocimiento en este campo (editado por Ahuja y Libby, 1993)

Paralelo a los trabajos de mejoramiento genético, en Costa Rica a partir del año 2000, las organizaciones miembro de GENFORES han logrado seleccionar más de 450 árboles plus de teca en las diferentes zonas semilleras del país, de los cuales un 80% están establecidos en sus jardines clonales comerciales. Así también, se ha incursionado en los ensayos de evaluación clonal de teca y en el desarrollo de una silvicultura clonal con la utilización de clones mejorados desde el año 2004, tratando de cubrir las zonas más importantes de reforestación de teca en el país (Murillo *et al.*, 2003). En Costa Rica la compañía Ston Forestal se convierte en la pionera en este campo a mediados de los años 90, quienes desarrollan su programa de mejoramiento genético con *Gmelina arborea* en el Pacífico Sur del país (Zeaser, 1996).

El desarrollo de las tecnologías de propagación *in vivo* han permitido un progreso asombroso en el cultivo de eucaliptos en el mundo (Xavier *et al.*, 2009), donde la productividad avanzó de 200m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en los años 70's, a superar actualmente la barrera de los 400m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a nivel operativo, con resultados de investigación que superan los 500m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en 7 años.

La silvicultura clonal impone un cambio en toda la concepción del modelo de plantación. La plantación se establece en forma de un mosaico de bloques monoclonales, donde cada uno de estos bloques es un solo genotipo replicado miles de veces y tendrá entonces un comportamiento prácticamente idéntico en crecimiento y calidad. Dado que cada individuo ha sido seleccionado y presentará un buen rendimiento comercial, nace la posibilidad de aprovechar mejor el sitio, así como intentar utilizar hasta el producto del primer raleo. Al lograrse una alta homogenización en la plantación, los raleos serán sistemáticos y se convertirán en una tarea mucho más fácil. El plan de aprovechamiento se simplifica ya que los productos a cosechar son todos muy similares. El espaciamiento inicial debe entonces replantearse, ya que al no existir diferencias entre los árboles de un mismo bloque monoclonal, se puede diseñar un manejo de la densidad inicial orientado exclusivamente a elevar la productividad y calidad de los fustes y a facilitar las labores de aprovechamiento, La tecnología clonal exige sin embargo, una mejor preparación del terreno, ya que el material enraizado es de menor tamaño a lo usualmente utilizado. Además, los clones tienden a ser mucho más sensibles a las condiciones de sitio que el material producido por semilla, por lo que su buen desempeño no necesariamente se mantendrá a lo largo de toda una región geográfica. Por razones de riesgo de una excesiva reducción de la variabilidad genética, se ha instaurado como norma internacional el uso mínimo de 15 a 20 clones y bloques monoclonales no mayores a 20 ha, en un programa clonal comercial en turnos cortos para producción de papel (Zobel, 1993). Dado que en Costa Rica el proceso forestal se orienta principalmente a la producción de madera sólida, en turnos de 12 a 20 años, es prudente que estos bloques monoclonales no superen las 5 ha.

Por lo anterior, se ha considerado actualmente a la reforestación clonal como parte de un programa de mejoramiento genético y silvicultural, como estrategia de combinación necesaria para alcanzar el éxito reportado en productividad y competitividad forestal de otros países. Para lograr la conjugación de estos factores, se requiere del trabajo serio, continuo y sistemático en el sector.

### 6.3. Proceso de captura vegetativa del árbol plus

Por lo general, en un programa clonal más del 60% de los clones seleccionados serán rápidamente eliminados debido principalmente a que **a)** no logran alcanzar una tasa comercial de enraizamiento (>70%), **b)** son muy susceptibles al ataque de hongos u otros



patógenos, **c)** algunos clones no rebrotan o no se logra ubicarlos de nuevo una vez tumbado el árbol. Posteriormente, más del 50% de los clones que permanecen en el programa son eliminados debido a **d)** que manifiestan un bajo rendimiento durante la evaluación en campo, o también **e)** muestran buenos rendimientos únicamente en condiciones de sitio muy particulares y no se pueden plantar en toda una región. Por estas razones, por lo general se seleccionan y clonan un número alto de individuos al inicio de un programa (1 por ha), siempre y cuando hayan superado todos los criterios propuestos de selección.

Los individuos elegidos se deben identificar con dos números: el primero que corresponderá al número de la finca o lote, y el segundo que será un número consecutivo dentro de esa finca o lote. Ejemplo: árbol **1-18**, que significa **individuo 18** de la **finca 1**. A cada árbol seleccionado en las plantaciones, se le marca uno o varios anillos completos con pintura fosforescente en el fuste, arriba del DAP si es posible, de manera que lo haga visible desde todo ángulo. Cada árbol plus debe también ser ubicado en un croquis en un plano de la(s) plantación(es) revisada(s). De ser posible se ubicarán sus coordenadas con ayuda de un GPS. Algunos de los árboles vecinos también deben ser marcados con pintura, con el fin de facilitar posteriormente la ubicación del tocón del árbol plus, una vez que éste ha sido talado para iniciar su clonación a partir de sus rebrotes. De ser posible se podrá colocar un poste, una bandera o una estaca de más de un metro de alto y que haya sido pintada.

La multiplicación vegetativa de los árboles plus seleccionados en un programa de mejoramiento genético forestal constituye uno de los eslabones más importantes en la reforestación clonal con prácticas de silvicultura intensiva y de precisión. Existen varias técnicas para realizar el proceso de captura vegetativa del árbol plus a clonar, entre ellas tenemos las siguientes:

**A). Talar el árbol plus.** Con aquellas especies que rebrotan fácilmente, todos los árboles plus pueden ser talados para iniciar su propagación vegetativa. En especies como *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* los nuevos rebrotes pueden iniciar su propagación a partir de 2-3 semanas después de cortado el árbol y hasta casi 2 meses en *Hieronyma alchorneoides*. Es recomendable seguir algunas prácticas de manejo del tocón y sus rebrotes para lograr una efectiva captura del árbol plus (Figura 6.1):

- ✓ Identificación en el campo.
- ✓ Apertura de luz podando o eliminando árboles vecinos.
- ✓ Control de malezas alrededor del tocón.
- ✓ Estado nutricional y fitosanitario (muestras foliares). Fertilización foliar alta en nitrógeno para estimular nuevos brotes.
- ✓ Dejar al menos un rebrote con hojas después de cada cosecha.



**Figura 6.1.** Proceso de clonación de un árbol plus, zona norte de Costa Rica.

Aun cuando cortar o talar el árbol plus no siempre es la mejor alternativa (ya que se pierde un árbol semillero), es posible también clonarlo a través de la inducción de rebrotes empleando diferentes técnicas, como la realización de heridas en la base del fuste, corte de ramas bajas, descope del árbol o quema controlada de la base del fuste, entre otras. Estas técnicas se explican e ilustran más adelante.

Con el fin de garantizar la identidad del material proveniente de cada clon, las colectas de rebrotes deben realizarse de manera ordenada, sistemática y en grupos de 20-30 clones cada vez. Debe cortarse con una podadora de mano únicamente los rebrotes vigorosos y sanos. Los rebrotes se cortan de 20 cm de largo medidos desde el ápice. Es conveniente no cosechar todos los rebrotes del tocón para no ocasionarle un severo estrés o su muerte. Se puede dejar una porción de tallo que contenga hojas o dejar un brote completo en cada cosecha. Los rebrotes cosechados de cada clon se envuelven en papel toalla o papel periódico húmedo, se amarran con una liga de hule cuidando de incluir una paleta de madera o plástico que identifique el número del clon. El material es depositado cuidadosamente en una hielera (caja de icopor, cartón o plástica con suficiente humedad) para mantenerlo fresco por unas horas, mientras se llega al invernadero y se inicie su preparación para la propagación.

Si se desea prolongar la vida y vigor de los tocones por más de 8 meses, es necesario eliminar algunos de los árboles a su alrededor, con el fin de aumentar la entrada de luz. Debe también mantenerse el tocón libre de malezas y especies trepadoras para que los rebrotes puedan desarrollarse. También puede aplicarse un abono foliar rico en nitrógeno una semana después de cada cosecha de rebrotes. Una posibilidad es la de permitir que uno de los rebrotes continúe creciendo, para que se mantenga vivo el tocón y para que eventualmente participe como árbol semillero.



**Figura 6.2.** Rebrotos inducidos por heridas en el fuste en cebo (*Vochysia guatemalensis*, izquierda) y botarrama (*Vochysia ferruginea*, derecha).

**B). Inducción de rebrotes.** En especies que tengan dificultad para producir brotes de tocón (*Alnus acuminata*, *Eucalyptus deglupta*, *Acacia mangium* y casi todas las coníferas), o cuando no sea posible talar al árbol plus, se puede intentar la inducción de brotes en el fuste provocados por heridas (Figura 6.2). Esta técnica se ha empleado sin embargo, con poco éxito en Costa Rica, ya que el brote producido ha sido excesivamente suculento y difícil de enraizar.

**C). Corte y siembra de ramas bajas del árbol.** Otra opción de propagación sin cortar el árbol plus, que se ha utilizado con teca de manera experimental, es la de cortar ramas bajas con buena actividad de crecimiento, que presenten un comportamiento en reiteración con el eje dominante (Figura 6.3). Estas ramas se pueden cortar y preparar en estacones de 50 a 75 cm. de largo, que son sembradas en camas de arena con buenas condiciones de humedad dentro de un invernadero. Estos estacones producen **brotes** que pueden servir como material vegetativo de

partida para poder iniciar con la clonación y multiplicación del árbol. Es importante tener presente que éstas ramas deben provenir en lo posible, de la parte más baja del fuste para obtener un material de comportamiento fisiológicamente juvenil. Sin embargo, debe tenerse siempre presente que los propágulos obtenidos con esta técnica, deben mostrar un crecimiento rápido y ortotrópico (crecimiento en sentido vertical). Esta técnica tiene sin embargo como limitante, que el proceso de clonación de cada árbol plus es relativamente lento y los primeros brotes deben aún superar un proceso de rejuvenecimiento. Con esta técnica se requiere de al menos un año de trabajo hasta lograr tener un pequeño lote de rametos por clon en un minijardín clonal (figura 6.3, derecha).



**Figura 6.3.** Clonación de árboles por medio de ramas bajas

**D). Descope del árbol plus.** En los últimos años se ha venido desarrollando con éxito en Córdoba, Colombia una nueva opción de clonación de especies de difícil propagación, como la *Acacia mangium*. Consiste en descopar el árbol y esperar unos 2 meses para capturar los nuevos brotes que aparecen en lo alto de la copa (Figura 6.4). La experiencia con esta especie ha mostrado que el brote nuevo que surge en la copa, presenta características juveniles, que permiten su propagación e incorporación en un programa clonal.



**Figura 6.4.** Clonación de árboles por medio de la técnica del descope.

Una ventaja de este sistema de descope, es que no se requiere tumbar al árbol plus y permite continuar visitándolo cada vez que sea necesario. El descope se realiza en la parte alta del árbol,

de modo que no interfiera con la zona de producción comercial. Esta modalidad implica un alto riesgo para los escaladores, ya que la realización de la labor de descope puede resultar peligrosa.

**E). Quema controlada de la base del árbol.** Otra técnica a nivel experimental que en Brasil están probando es la quema controlada de la base del fuste, como una técnica de inducción de rebrotes en especies muy difíciles de clonar el árbol adulto. Sin embargo esta técnica puede conllevar muchos riesgos de incendios en plantaciones forestales, si no se toman las medidas preventivas del caso (Figura 6.5).

Para la ejecución de esta técnica se usan hojas y ramas secas de los árboles, las cuales son amontonadas en la base del tronco y protegidas por una estructura metálica formando dos semicírculos yuxtapuestos y unidos, con una apertura lateral como un horno por donde se enciende el fuego. El tratamiento dura entre 10 y 20 minutos a una temperatura de 70°C. Después de cerca de 20 días de aplicado el tratamiento, brotes epicórmicos empiezan a aparecer en la base del árbol y a los 45-50 días son cosechados para enraizamiento.

Los resultados de este método se basan en el principio de degradación de la auxina endógena por el calor, lo cual altera la relación auxina/citocinina promoviendo la emisión de nuevos brotes en la base del árbol justo debajo del área afectada por el fuego (Alfenas *et al.*, 2004).

Es importante recordar que esta técnica es peligrosa, ya que, en caso de un mal uso, puede ocasionar la muerte del árbol o provocar incendios forestales, por lo tanto no es muy frecuentemente utilizada en la clonación de árboles superiores. Al igual que otras técnicas los resultados también dependen de la especie, época del año, condiciones fisiológicas y ambientales.



**Figura 6.5.** Uso del fuego para inducción de rebrotes en árboles (Alfenas *et al.*, 2004).

#### **6.4. Importancia y evolución del jardín clonal.**

El jardín clonal o área de multiplicación es uno de los componentes principales de todo el sistema de reforestación clonal. Este debe verse como un cultivo que será manejado en un sistema de producción muy intensivo, que requiere por tanto de un buen manejo del estado nutricional de las plantas. El sitio donde se establece el jardín clonal debe ser preferiblemente de alta productividad agrícola, sin problemas de drenaje, fácil acceso, disponibilidad de agua y electricidad.

En el jardín clonal es donde se tendrá la colección completa de todos los árboles plus seleccionados originalmente. Cada árbol plus ha sido entonces propagado a partir de sus brotes en el tocón, o a partir de otras partes vegetativas. Todas y cada una de las estaquillas que se logren reproducir de un mismo árbol plus son copias genéticamente idénticas y se les denomina como rametos. De aquí en adelante se les identifica con el código del árbol plus. El árbol plus junto con todos los posibles rametos o copias idénticas que se obtengan de él constituyen el clon. De aquí la importancia de mantener rigurosamente la identidad de todo el material que se propaga.

Para lograr producir plantas en la cantidad y calidad requeridas por el programa de plantas comerciales, es necesario desarrollar una colección con todos los árboles plus seleccionados y capturados en el campo. Estas colecciones se establecen en jardines clonales en ambientes protegidos, con el fin de lograr su producción a la escala deseada, en cualquier época del año, al menor costo posible. Para lograr mayor calidad, eficiencia y eficacia en los procesos de

producción de clones, los jardines clonales han evolucionado, iniciándose con los minijardines clonales al aire libre directamente en el suelo; luego aparecieron los jardines clonales establecidos en potes o bolsas con suelo mejorado y uso de sombra; después a través de un gran salto tecnológico aparecieron las colecciones clonales dentro de un ambiente protegido, con diseños desde rústicos a sofisticados; las colecciones clonales evolucionaron de jardín clonal a minijardín clonal con sistemas hidropónicos y últimamente se ha propuesto la tecnología del minijardín clonal virtual (Badilla & Murillo, 2009).

A continuación se describen e ilustran las características específicas más importantes y la evolución de los jardines clonales.

En los inicios de los programas de producción clonal forestal, se establecieron los primeros minijardines clonales al aire libre. Esta estrategia, a pesar de tener muy bajo costo de establecimiento y manejo, requería de grandes extensiones de terreno y no lograba controlar los efectos del clima y del suelo en el comportamiento de los materiales. Las plantas se plantaban a 40 x 40 cm, que resultaba en 6,25 plantas/m<sup>2</sup>. Aparecieron entonces los jardines clonales establecidos en potes con suelo mejorado y uso de sombra, que lograron aumentar la producción y control de la producción (Figura 6.6). Pero fue posteriormente, cuando se introdujeron las colecciones clonales dentro de un ambiente protegido, que se logró un gran salto en el control de la producción, aumento de la productividad del sistema de clonación, disminución de costos de producción por planta y una alta eficiencia en general del sistema.



**Figura 6.6.** Primeros tipos de jardines clonales establecidos en el suelo al aire libre (izquierda) y en potes con suelo mejorado (derecha).

Los primeros diseños de ambiente protegidos fueron rudimentarios; poco a poco fueron incorporando las nuevas tecnologías y experiencias utilizadas con gran éxito en el campo agrícola (Figura 6.7).



**Figura 6.7.** Utilización de ambientes protegidos para la producción clonal, rudimentario (izquierda) y nueva tecnología (derecha).

Las colecciones clonales evolucionaron de jardín clonal a minijardín clonal. El espaciamento utilizado disminuyó hasta 10 x 10 cm, con una cantidad de 100 plantas/m<sup>2</sup>.

De cada planta establecida en el jardín clonal, se obtendrán brotes terminales periódicamente, por lo general, cada 1 a 2 semanas. Estos brotes tiernos, succulentos, son el material base de propagación vegetativa (Figura 6.8). Toda una nueva silvicultura ha nacido relacionada con el manejo nutricional, riego, prevención y control fitosanitario, manejo y mantenimiento de la infraestructura de ambiente protegido. Nuevo conocimiento ha sido necesario, especialmente en el campo de la fisiología del comportamiento de estas miniplantas y su fenómeno de enraizamiento.

El sistema de producción clonal en ambiente protegido se compone de tres grandes espacios: **a)** Minijardín clonal; **b)** Área de Enraizamiento y **c)** Área de aclimatación y despacho de plantas. El espacio del minijardín clonal es donde se establece la colección genética del programa de mejoramiento genético. Puede decirse que es la sección más valiosa de todo el sistema clonal.



**Figura 6.8.** Cosecha de brotes terminales en minijardines clonales dentro de un ambiente protegido.

Por lo general se subdivide el espacio del minijardín clonal en dos secciones: Colección Clonal y Producción Comercial (Figura 6.9). Estas secciones es conveniente que se ubiquen en espacios o compartimentos separados, por razones de seguridad y mejor manejo de las plantas. La colección clonal contiene todos los árboles plus del programa de mejoramiento, mientras que la sección de producción comercial, contiene exclusivamente los mejores 15 a 20 clones del programa (población élite).



**Figura 6.9.** Sección para la colección clonal (izquierda) y sección de producción comercial (derecha), con los mejores 15 a 20 clones del programa de mejoramiento genético (subpoblación élite) de la organización.

### 6.5. Establecimiento y manejo del jardín clonal.

El establecimiento y el manejo del jardín clonal constituye el puente que permite multiplicar con calidad los productos del mejoramiento genético (árboles plús y clones) para llevarlos a evaluación en ensayos genéticos (progenies, procedencias, clones, etc) y/o plantación comercial. A continuación se presentan e ilustran las recomendaciones específicas más importantes sobre la preparación, tamaño y manejo de los diferentes sistemas de jardines clonales.

#### A). Preparación y manejo del terreno para el jardín clonal al aire libre.

El terreno debe ser arado y rastreado (preferiblemente 2 veces) unos 2 meses previo al inicio de la siembra del material enraizado. En caso de existir alguna pendiente debe incluirse la abertura de desagües o salidas del agua. Si se tiene algún problema de drenaje, el terreno deberá ser subsolado a unos 50-60 cm de profundidad. Para mejorar las características físicas y propiedades químicas del suelo, se puede incluir la aplicación de abono orgánico y  $\text{CaCO}_3$  (cal), que puede ser incluido durante el trabajo de rastreado del terreno.

Problemas de suelos muy ácidos deben ser corregidos con un encalado (carbonato de calcio) con base en la siguiente fórmula:

$$\text{Toneladas de carbonato de calcio/ha} = [(1,8 \cdot \% \text{ saturación Al}) - 25] \cdot \text{CICE} / 100$$

Donde %saturación Al es el porcentaje de saturación de aluminio y CICE es la capacidad de intercambio catiónico obtenidos en el análisis de suelos.

La cal debe ser aplicada de forma superficial y con una distribución homogénea en el campo. Debido a que la cal requiere de humedad para reaccionar, el momento apropiado para aplicarla es en época cercana al inicio de las lluvias. Si la acidez del suelo es muy alta, el encalado deberá repetirse al menos 2 veces al año y procurando realizarlo al menos 1 mes antes de aplicar el abono orgánico. El jardín clonal deberá ser fertilizado en forma abundante con abono orgánico granulado unas 2 veces al año, acompañado de una fertilización foliar alta de nitrógeno 1 semana después de la cosecha mensual.

En el mercado es posible también conseguir una gama de productos orgánicos alternativos a los fertilizantes sintéticos. Algunos de estos productos son el Humate GR y el lornbricompost (125 sacos a \$5,91/saco). Estos productos, al igual que el abono orgánico, pueden ser aplicados unas dos veces al año.

El uso de herbicidas no es recomendable ya que el jardín clonal se irá estableciendo lentamente y su mayor parte no estará ocupada sino hasta unos 10-12 meses de iniciado el programa.

El uso de carbón de origen vegetal se ha utilizado con éxito en minijardines clonales con especies forestales (Chacón & Murillo, 2005). Como fuente de carbón se puede utilizar la cascarilla de arroz calcinada. Entre sus propiedades principales figura la capacidad de absorción de tóxicos existente en el sustrato, mejoría en retención de humedad en sustratos de arena, entre otras funciones.

### B). Tamaño del jardín clonal.

El tamaño del jardín clonal depende de: **a)** del área anual y densidad de plantación y **b)** número de meses disponibles de plantación al año; **c)** tasa de mortalidad y de control de calidad durante el proceso de producción de estaquillas. En el jardín clonal estarán presentes todos y cada uno de los árboles plus seleccionados (clones). Para cada clon se establecerá una parcela, que deberá estar claramente identificada y separada de los demás clones. Sin embargo, debido a que la mayoría de los clones no presentan una tasa de enraizamiento comercial (>70%), deberá entonces definirse dos grupos de clones desde el principio: **i)** población de clones comerciales y **ii)** población de clones del programa de mejoramiento genético. Los 15-20 clones con la mayor tasa de enraizamiento constituirán la población de clones comerciales, de manera provisional hasta tanto los ensayos genéticos indiquen otra cosa. Debe recordarse que los 15-20 clones de la población comercial constituyen la base genética (diversidad) mínima que debe ser plantada en el campo. Todos los demás clones, incluyendo los comerciales, conformarán la población de clones de mejoramiento, cuyas parcelas serán de menor tamaño y se utilizarán exclusivamente para el establecimiento de los ensayos de evaluación clonal (aproximadamente 50 rametos/clon), como se describe más adelante (Figura 6.5).

Si por ejemplo una organización o empresa requiere plantar 50 ha/mes durante 4 meses y si se tiene en el programa 20 clones comerciales en producción, se debe planificar plantar al menos 2,5 ha/clon/mes. Esto implica que cada parcela clonal deberá proporcionar al menos 2750 plántulas efectivas/mes. Para alcanzar esta meta de producción se requiere contar con alrededor de 700 rametos activos/clon. Recuérdese que de cada rameto se obtendrá en promedio 4 brotes por mes, que equivalen a 2,8 plántulas útiles/rameto/mes. Esto significa que se necesitarán 26 x 27 rametos (700 rametos/clon) que sembrados a cada 40 cm, conforman entonces una parcela clonal comercial de 10,4m x 10,8m = 112 m<sup>2</sup>/clon en el jardín de multiplicación. Sin embargo, por razones de seguridad, conviene planificar un 20% adicional de rametos, ya que es común que algunos de ellos presenten problemas fitosanitarios o de baja producción de brotes en determinadas épocas del año. Esto significa que se necesitarán 700 rametos\*1,2 = 840 rametos/clon comercial. Cuya superficie será entonces de 29 x 29 rametos, que equivale a 11,6m x 11,6m, para una superficie total por clon comercial de 135 m<sup>2</sup>. Esto implica un área total de producción con 20 clones comerciales\*135 m<sup>2</sup> = 2700 m<sup>2</sup> para todo el jardín clonal comercial. A esta área debe agregársele espacio para calles y entrecalles, que se puede estimar en un 50% adicional de área, lo cual significa que un jardín clonal para tal demanda, deberá contar con al menos 0,4 ha en producción. Esta estimación de la superficie del jardín clonal comercial puede también obtenerse mediante la siguiente fórmula:

**No. de rametos/clon (NRC) =**

$$\frac{\{[(\text{No. has plantar/mes})/(\text{No. clones comerciales})]*(\text{árboles/ha})*(\text{rametos de seguridad})\}}{[(\text{No. cosecha/mes})*(\text{No. brotes/rameto/cosecha})*(\text{tasa enraizamiento})]}$$

Para el ejemplo desarrollado sería:

$$\text{NRC} = \frac{\{[(50 \text{ ha/mes})/(20 \text{ clones})]*(1.111)*(1.2)\}}{[(2 \text{ cosecha/mes})*(2 \text{ brotes/rameto/cosecha})*(0,7)]} = 1190 \text{ rametos}$$

La superficie por parcela clonal se obtiene entonces como sigue:

$\sqrt{1190}$  rametos = 34,5 que se puede redondear a 34x35 rametos = 1190 rametos/clon, que equivale a (34\*0,4m) X (35\*0,4m) = 13,6m x 14m (190m<sup>2</sup>) de cada parcela clonal comercial.



Mientras que para el archivo clonal se requerirán 50 rametos/clon = 7x7 rametos sembrados a 40 cm, para un total de 2,8m x 2,8 m = 8 m<sup>2</sup>/clon. Si el programa tiene unos 200 clones en evaluación, esto implicará un área total para el archivo clonal de 1.600 m<sup>2</sup> + 800 m<sup>2</sup> (50%) de calles y entrecalles = 2.500 m<sup>2</sup>.

### C). Tamaño del invernadero.

El tamaño del invernadero estará en función de: **a)** tasa de enraizamiento y sobrevivencia postenraizamiento de las estacas, **b)** sistema de enraizamiento (en bandeja, en pellet, en bolsa, etc.), **c)** duración de la especie en toda su fase de enraizamiento y aclimatación en el invernadero y **d)** de la duración del período de plantación o demanda mensual de material. Para el ejemplo que se utilizó en la estimación del tamaño del jardín clonal, se tiene una demanda de material para plantar 50 ha/mes. Esto implica una producción no inferior a las 56.000 plántulas efectivas/mes. Si se está clonando una especie de crecimiento medio como *Tectona*, *Gmelina* o *Hieronyma*, entonces se podrá producir una cosecha de plántulas tres veces por mes (cada 10 días) en el invernadero. Si la tasa de enraizamiento promedio es de un 70%, el invernadero deberá albergar 80.000 estacas simultáneamente para lograr obtener las 56.000 plántulas efectivas/mes. En la Tabla 6.1 se presentan diferentes tamaños del invernadero en función del sistema de producción, tasa de enraizamiento y de la demanda de material enraizado por mes.

Tabla 6.1. Tamaño del invernadero en función del sistema de producción, de la tasa de enraizamiento y de la demanda de material enraizado por mes

Sistema de enraizamiento	Cantidad de estacas / m <sup>2</sup> de invernadero <sup>1</sup>	Cantidad de estacas efectivas/m <sup>2</sup> de invernadero según tasa de enraizamiento			Tamaño del invernadero (m <sup>2</sup> ) según tasa de plantación mensual y tasa de enraizamiento <sup>2</sup>			
		60%	70%	80%	50 (ha)		100 (ha)	
					60%	80%	60%	80%
Pellet de 50 mm	143	85,8	100,1	114,4	648	486	1295	971
Pellet 42 mm	210	126,0	147,0	168,0	440	330	882	661
Pellet 36 mm	288	173,0	202,0	230,0	321	240	642	483
Pellet de 30 mm	418	250,8	292,6	334,4	221	166	443	332
Bolsa plástico de 80 mm	138	82,8	96,6	110,4	671	503	1342	1006
Bandeja plástica de 98 unidades	294	176	205	235	315	236	632	473

1. Incluye 48% de pasillo y 95% de ocupación dentro de la cama de producción.

2. Para un distanciamiento de siembra de 3x3m se calcula: (No. árboles/ha\*No.ha)/(No. estacas efectivas/m<sup>2</sup>).

### D). Manejo del jardín clonal.

Todo jardín clonal tiene tres fases: **i)** una fase de producción, **ii)** una fase de mantenimiento y **iii)** una fase de recuperación o renovación de las plantas. La fase de producción inicia varios meses antes de la estación lluviosa, mientras que la fase de mantenimiento y recuperación al finalizar el período lluvioso. Durante la fase de producción es conveniente revisar el estado fitosanitario del jardín clonal. Los rametos enfermos deben ser separados rápidamente. Las hojas basales (viejas) van disminuyendo su capacidad fotosintética y deben ser eliminadas una vez que haya suficientes hojas nuevas.

Uno de los aspectos principales es la nutrición del jardín clonal. El sistema de producción de brotes durante la fase de producción, requiere que cada 8-10 días se proceda a cosechar nuevos brotes para su enraizamiento. Esto implica que este cultivo debe ser fertilizado frecuentemente con productos foliares como los orgánicos: ACRI-GRO y CARBO-VIT (1 litro/estaño), así como CROP+ y NPK o CITOZYME (1/2 litro/estaño), que se pueden conseguir en el mercado. La fertilización foliar debe realizarse una semana después de cada cosecha con alguno de los productos mencionados. La aplicación de encalado y abono orgánico al terreno, son prácticas

recomendadas al menos cada seis meses o durante el proceso de renovación anual del minijardín clonal.

La aplicación de los fungicidas orgánicos como el KILOL y el EVERGREEN, así como el BENLATE y el AGRIMICÍN, son recomendados cada 2-3 semanas de manera preventiva. En caso de aparición de síntomas de presencia de hongos, se deberá eliminar periódicamente todo el material enfermo del jardín y aplicar estos mismos productos cada 8-10 días.

Un sistema de riego es recomendable para suplir de agua durante aquellos días de alta insolación o fuertes vientos. Además, durante la época seca es imprescindible contar con un buen sistema de riego, ya que puede inducir la aparición de un estrés severo en todo el material.

En caso de ataque de plagas (áfidos por ejemplo), existe en el mercado nacional un producto EVERGREEN basado en ajo, que actúa como repelente natural de insectos. Este tipo de productos pueden aplicarse siguiendo las dosis especificadas en el mismo, en caso de sospecha de presencia de alguna otra plaga conocida.

El control de malezas es uno de los aspectos de mayor importancia. Cada 1-2 meses deberá realizarse una deshierba manual o con motoguadaña de todo el jardín clonal. Herbicidas como el Round up pueden ser también aplicados para mantener bajo control las malezas, tanto en las parcelas clonales como en los pasillos.

Por lo general, en los jardines clonales se ha alcanzado una mayor producción de brotes en rametos de tallo corto (15-20 cm), ya que se obtienen brotes más suculentos, que son los que enraízan más rápido y mejor.

Durante la fase de mantenimiento y renovación del jardín clonal, se debe dejar "descansar" las plantas. Entre las labores básicas de mantenimiento están el control de malezas, eliminación de rametos enfermos, encalado y fertilización, entre otras. En algunos jardines clonales se acostumbra dejar crecer los brotes con el fin de darle vigor a la planta. Esta práctica debe ser revisada continuamente, ya que puede producir tallos excesivamente gruesos.

#### **E). Sistema de producción de clones en potes.**

Cuando se tienen problemas severos con la fertilidad natural del suelo o con patógenos en el sitio disponible para el establecimiento del jardín clonal, es posible desarrollar los clones en potes plásticos de jardinería (de unos 20 cm de diámetro por unos 20 cm de alto). Estos potes contienen como sustrato tierra + materia orgánica (25 a 30%) y granza seca ele arroz (5%). Se estima que en este sistema un rameto podrá soportar unos 3 años útiles antes de ser renovado. En las primeras experiencias hasta ahora desarrolladas se ha visto un mejor desarrollo inicial del rameto y una pronta producción de brotes. Este sistema permite también un mejor manejo de problemas con hormigas y otros problemas fitosanitarios, ya que es más fácil la manipulación de los rametos de un lugar a otro, así como de aislar a un clon enfermo (ver Figura 6.5).

#### **F). Sistema de producción de clones en sistemas hidropónicos.**

La utilización de sistemas hidropónicos para la producción de material vegetativo forestal se experimentó a inicios de los años 2000 en Costa Rica y Colombia, pero ya se tienen resultados de gran importancia en universidades y empresas privadas a escala comercial. Inicialmente, la experiencia con sistemas hidropónicos ha sido exclusivamente con cultivos anuales de corta duración (hortalizas, flores y ornamentales) y no con una planta leñosa, que deberá mantenerse viva durante un periodo mayor de producción. Las primeras investigaciones en los invernaderos del instituto Tecnológico de Costa Rica, muestran que el uso de canoas o canaletas de 6 u 8 metros de largo, con sustratos de grava y con carbón vegetal (50:50) han dado resultados prometedores. El sistema se alimenta en forma continua con una solución completa de elementos mayores y menores diluidos en agua y almacenada en un estañón enterrado a ras del suelo. La solución es impulsada a través de la tubería con una bomba de achique de bajo poder (0,15 caballos de fuerza), que alimenta cada una de las canoas del sistema. Las canoas tienen una pendiente de un 5% que permite el flujo de la solución y su retorno al estañón de almacenamiento. El diseño del sistema permite hasta 8 canoas de producción en un plano inclinado, con una capaci-

dad de 20 rametos/m<sup>2</sup> (en contraste, el jardín clonal en potes tiene una capacidad de 11 rametos/m<sup>2</sup> y en el suelo de 6,2 rametos/m<sup>2</sup>).

El jardín clonal en sistema hidropónico es prometedor para organizaciones con problemas de espacio y calidad de suelos. Sin embargo, su alto costo inicial y la necesidad de mayor investigación no permiten aún su utilización a escala comercial (Figura 6.10).



**Figura 6.10.** Jardín clonal en sistema hidropónico.

En Colombia a través de la realización del proyecto: “Selección de árboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea roxb*) y acacia (*Acacia mangium willd*) en el departamento de Córdoba”, se han seleccionado en campo durante los años 2008 a 2010, un total de 89 árboles superiores de acacia, 49 de melina y 46 de teca, en 20 plantaciones comerciales aproximadamente. El proceso de captura vegetativa de los árboles plus, mediante el corte de ramas bajas, jóvenes y de 50 centímetros de largo de los árboles, sembradas en camas de arena con buenas condiciones de humedad dentro de un invernadero; permitió producir brotes que se utilizaron como material vegetativo de partida para poder iniciar la clonación y multiplicación en jardín clonal de 40 árboles, con los cuales se han sembrado dos ensayos de evaluación de clones, uno de melina de 15 clones y otro de teca de 25 clones (Espitia, 2010).

### **Bibliografía**

AHUJA, M.R. & LIBBY, W.J. 1993. Clonal Forestry II, Conservation and Application. Springer-Verlag, Berlín. 240 pp.

ALFENAS A.C., ZAUZA E.A.V., MAFIA R.G., ASSIS T.F. 2004. Clonagem e doenças do eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 442 p.

ARAMENDIZ, H.; ESPITIA, M.; CARDONA, C. 2010. Mejoramiento genético de plantas. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Córdoba. Impreso universitario. 327p.

BADILLA, Y., RODRÍGUEZ, L., MURILLO, O. Y OBANDO, G. 2000. Avances en la clonación de cebo, botarrama, pilón y almendro. Programa de mejoramiento y conservación genética de especies forestales. Reporte de Investigación No. 1. 11 p.

BADILLA Y. y MURILLO, O. 2009. Evolución de los sistemas de propagación clonal in vivo de teca en Costa Rica. En: I Congreso Internacional del Cultivo de teca. Universidad de Quevedo, Ecuador. 16-17 de setiembre, 2009.

CAMCORE. 1999. 1999 Annual Report. North Carolina State University. College of Forest Resources. Raleigh, North Carolina. EUA. 23p.

Chacón, P; Murillo, O. 2005. Análisis comparativo de la producción de minijardines clonales hidropónicos y jardines clonales en tierra de melina (*Gmelina arborea* Roxb.). Kurú: Revista Forestal 2(6):7 p. [http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista\\_Kuru/anteriores](http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/anteriores) (Consultado: mayo/17/2010).

CORNELIUS, J.; UGARTE-GUERRA, L. 2010. Introducción a la Genética y domesticación forestal para la Agroforestería y Silvicultura. *Notas de clase*. Lima, Perú. Centro mundial para la agroforestería (ICRAF). 124 p.

ESPITIA, M. 2010. Selección de arboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea roxb*) y acacia (*Acacia mangium willd*) en el departamento de Córdoba – Sexto Informe de Avance. Documento impreso. Montería, dic/15/2010. 116p.

FAO, 2010. Síntesis: Estado actual y opciones para las biotecnologías forestales en los países en desarrollo. Conferencia sobre las Biotecnologías Agrícolas en los Países en Desarrollo (ABDC-10). Guadalajara (México), 1 – 4 de marzo de 2010. <http://www.fao.org/biotech/abdc/backdocs/es/> (Consultado: Mayo/27/2010)

KLEINSCHMIT, J., KHURANA, D.K., GERHOLD, H.D. & LIBBY, W.J. 1993. Past, present and anticipated applications of clonal forestry. En: Ahuja & Libby (eds). Clonal Forestry II, Conservation and Application. Springer-Verlag Berlín: 9-41p.

MASCARENHAS, A.F; MURALIDHARAN, E.M. 1993. Clonal forestry with tropical hardwoods. Capítulo 10. En: Ahuja & Libby (eds.) Clonal Forestry II. Conservation and Application. Springer-Verlag, Berlín, Alemania: 169-176.

MESÉN, F. 1998. Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. CATIE. PROSEFOR. Serie Técnica. Manual Técnico No. 30. Turrialba, Costa Rica. 36 p.

MESÉN, F. Y TREJOS, E. 1998. Propagación vegetativa del San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donn. Smith) mediante enraizamiento de estacas juveniles. Revista Forestal Centroamericana 21: 19-24.

MESÉN, F., LEAKEY, R.R.B. Y NEWTON, A.C. 1992. Hacia el desarrollo de técnicas de silvicultura clonal para el pequeño finquero. El Chasqui (CATIE, Costa Rica) 28: 6-18.

MONTEUUIS, O; VALLAURI, D; POUPARD, C; HAZARD, L; YUSOF, Y; LATIP., A.W; GARCÍA, C; CHAUVIÈRE, M. 1995. Propagation clonale de teck matures par bouturage horticole. Bois et Foret des Tropiques 243: 25-39

MURILLO, O., BADILLA, Y. & OBANDO, G. 2001. ¿Semillas versus propagación vegetativa: hacia dónde vamos?. Revista Forestal Latinoamericana 16 (30): 67-77.

MURILLO, O.; ROJAS, J. L. Y BADILLA, Y. 2003. 2da edición. Reforestación Clonal. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 36 p.

MURILLO, O y BADILLA, Y. 2004. Breeding teak in Costa Rica. En: IUFRO Meeting. Forest Genetics and Genomics. 1 – 5 de noviembre. Charleston, South Carolina, USA. [www.ncsu.edu/feop/iufro\\_genetics2004/proceedings.pdf](http://www.ncsu.edu/feop/iufro_genetics2004/proceedings.pdf)

MURILLO, O. 2006. Producción de semilla mejorada a gran escala en Costa Rica a través de GENFORES: modelo de vinculación Academia – empresa. En: I Curso Internacional sobre producción y conservación de semillas forestales. 21-23 Octubre 2006. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

MURILLO, O. 2010. Retos para el desarrollo de plantaciones forestales en Costa Rica. Ponencia magistral. En: IX Congreso Nacional Agronómico y Forestal. San José, Costa Rica. 4-6 agosto 2010.

- NÚÑEZ, Y. 1997. Propagación vegetativa del cristóbal (*Platymiscium pinnatum* Benth), pilón (*Hieronyma alchorneoides* Allemo) y surá (*Terminalia oblonga* Ruiz&Pavon) mediante el enraizamiento de estacas juveniles. Tesis M.Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 150 p.
- XAVIER, ALOISIO; WENDLING, IVAR; DA SILVA, ROGÉRIO. 2009. Silvicultura Clonal. Principios e Técnicas. Editorial Universidad Federal de Vicosa. Vicosa, Minas Gerais, Brasil. 272 p.
- ZEASER, D. 1996. Comportamiento temprano de familias de progenies de Melina producido por polinización abierta entre clones de árboles plus en Huerto Semillero. En: III Taller Nacional Forestal y Agroforestal, 14-16 noviembre, 1995. Hacienda La Pacífica, Cañas, Guanacaste. 7p .
- ZOBEL, B Y TALBERT, J. 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley & Sons. New York, USA. 510 p.
- ZOBEL, B. 1993. Clonal forestry in Eucalypts. En: Ahuja & Libby (eds.) Clonal Forestry II. Conservation and Application. Springer-Verlag, Berlín, Alemania: 139-148.
- ZOBEL, B., VANWYK, G., STAHL, P. 1987. Growing exotic forests. John Wiley & Sons. New York, USA. 508 p.

## Capítulo 7. Viverización de plantas para ensayos de evaluación genética

### 7.1. Invernaderos y propagación vegetativa de miniestacas.

Como una actividad esencial en todo programa de mejoramiento genético está la evaluación de las colecciones de árboles superiores en campo. Los materiales deben ser evaluados en varios sitios representativos y replicados varias veces. Por tanto, es de suma importancia la reproducción del material a evaluar de manera eficiente y producir las plantas de la mejor calidad posible, para evitar incorporar algún tipo de error experimental. Como principio, debe garantizarse que cada árbol a ser evaluado, esté representado por plantas de excelente calidad.

Según varios autores (Gatti *et al.*, 2011; Ladrach, 2010; Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; Vallejos *et al.*, 2010; Xavier *et al.*, 2009; Murillo, 2005; Chacón y Murillo, 2005; Murillo *et al.*, 2003; Murillo *et al.*, 2001a y 2001b; Mesén, 1998a y 1998b; Morales, 1999; Monteuis *et al.*, 1995; Zobel, 1993; Ahuja y Libby, 1993; Mascarenhas y Muralidharan, 1993), para lograr una adecuada propagación vegetativa de las colecciones genéticas es necesario establecer un invernadero con condiciones para lograr los tres factores principales requeridos: **a)** una reducción en la actividad fotosintética (sombra de sarán por lo general), **b)** una humedad relativa alta (>80-90%) que evite en todo momento el estrés hídrico, y **c)** una temperatura ambiente entre 30 y 35°C (con la instalación de un túnel de plástico transparente debajo del sarán).

La estructura del invernadero debe ser lo más simple y funcional posible. Para sostener un techo y paredes de sarán no es necesario utilizar una estructura costosa y de gran resistencia. Si se cuenta con suficientes recursos, esta estructura puede ser construida con tubo delgado (1 pulgada) acoplado o soldado en sus esquinas. Con el uso de pintura anticorrosiva, este tipo de estructura debe tener una vida útil no inferior a los 10 años. El uso de postes de una madera semidura como *Tectona grandis*, *Hieronyma alchorneoides* u otra especie disponible, debe ser inmunizada o preservada con alquitrán u otro producto disponible, de modo que sea un material viable durante al menos 3 años de producción. Los postes deben lograr darle una altura al techo de sarán de unos 3 o más metros. El techo y paredes deberán estar conformados por sarán y plástico, para lograr un mayor control de la luminosidad, evitar el efecto desecador del viento y mantener una humedad relativa alta. Sin embargo, si el invernadero está totalmente cerrado, puede alcanzar temperaturas internas de hasta 50 °C al mediodía y provocar algún daño en las plantas cuando no se cuente con un sistema de riego óptimo. Por lo que se acostumbra dejar una ventana longitudinal, a todo lo largo de las paredes laterales, donde se deja el sarán pero se elimina el plástico, con lo que se garantiza un flujo de aire que disminuya los picos de temperatura internos.

Según varios autores (Gatti *et al.*, 2011; Ladrach, 2010; Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; Vallejos *et al.*, 2010; Xavier *et al.*, 2009; Murillo *et al.*, 2003), dentro del invernadero deben establecerse líneas de producción o camas también de madera y poste rollizo a una altura de trabajo de 1 metro. Las camas también pueden ser construidas con tubo de  $\frac{3}{4}$  de pulgada. Estas camas de producción, pueden ser construidas con tubo metálico soldado o acoplado, para aumentar su vida útil a unos 10 años. Estas camas no deben tener más de 1-1,2 m de ancho para que el sistema de riego logre mojar de manera uniforme todas las estacas de la cama. Sobre estas camas se coloca una malla o cedazo bien ajustado con madera (reglas de  $\frac{1}{2}$  x 3"), como base donde se colocarán las bandejas de enraizamiento. Puede también establecerse un marco de madera alrededor de toda la cama de producción, (utilizando una regla de  $\frac{1}{4}$  x 3") sobre la cual se sostienen las bandejas de enraizamiento. Estas bandejas de enraizamiento pueden ser fabricadas con reglas de desecho o madera de bajo costo. En cada línea de producción deberá instalarse una línea de riego automático de aspersion nebulizada, con aspersores cada 1-1,5 m. Además deberá construirse un minitúnel con plástico transparente, procurando

forrar todas paredes y piso de la cama. Este minitúnel deberá tener una altura no mayor a los 40 cm para lograr crear una cámara húmeda y alta temperatura en el ambiente de enraizamiento. Es importante que cada cama o línea de producción se divida en pequeños compartimentos con plástico, para lograr un mayor control de la producción y un mejor manejo preventivo de posibles problemas fitosanitarios (Ver Figura 7.1).

Un invernadero de 7 m de ancho y 12 m de largo, con 4 líneas de producción, tiene una capacidad de albergar 18.400 miniestacas (con pellets de 42 mm de diámetro) en cada ciclo de producción (de 6-8 semanas). Si se utilizan las bandejas plásticas negras de horticultura con 200 unidades, la capacidad puede aumentar hasta aproximadamente 25.000 miniestacas (600 miniestacas/m<sup>2</sup> de área efectiva de minitúnel). Esta relación de producción asume un 50% del área de invernadero destinada a pasillos y accesos (Vallejos *et al.*, 2010; Murillo *et al.*, 2003).



Figura 7.1. Minitúneles en un invernadero de propagación vegetativa.

## 7.2. Sustrato para el enraizamiento.

El enraizamiento de estacas requiere un sustrato especial para lograr este objetivo con calidad, de forma eficaz y eficiente, el cual dependerá principalmente de si se cuenta o no con un sistema de riego, y de si se desea que en el mismo medio de enraizamiento sea luego transferida la nueva planta al sitio de plantación. Si se tiene un sistema de riego automático nebulizado, el mejor sustrato es la arena pura y desinfectada. En los últimos años se desarrolló la técnica de aeroponía o enraizamiento al aire, donde no hay sustrato. Pero para lograr utilizar esta técnica de enraizamiento es imprescindible contar con un excelente sistema de riego.

Cuando no se cuenta con un buen sistema de riego entonces deberá utilizarse un sustrato capaz de retener la humedad, entre otros, tierra con arena (50:50), tierra pura o con un 10% de granza o cascarilla de arroz, carbón o arena con carbón (Gatti *et al.*, 2011; Xavier *et al.*, 2009; Chacón y Murillo, 2005), o también los pellets o pastillas silvícolas. Las bandejas plásticas de 120 a 200 unidades funcionan bien con el sustrato arena, pero aproximadamente a las 3 semanas deben ser trasplantadas las estaquillas

sobrevivientes, ya que el sistema radical puede empezar a sufrir daños. Esto implica que la estacilla enraizada no podrá llevarse al campo en la bandeja, sino en algún tipo de pote como la bolsa plástica, el pellet u otra opción deseada (tubetes). Con la *Gmelina arborea* ha dado excelentes resultados el enraizamiento de las estaquillas en bandejas de 120 unidades y utilizando el aserrín fino fresco de la misma especie como sustrato. Este sustrato forma una especie de adobe que permite al final del período (28 a 35 días aproximadamente), que la nueva planta pueda ser retirada fácilmente de la bandeja y sin daño a sus raíces, para que pueda ser plantada inmediatamente. Otros sustratos que se han utilizado con éxito en sistemas de producción de plantas en bandeja, están basados en la relación: de 20-30% de materia orgánica, 10-15% de granza de arroz y un 60-70% de tierra. Este tipo de sustrato permite al final del proceso de enraizamiento, que la planta salga fácilmente de la bandeja junto con un pequeño adobe (ver Figura 7.2). La incorporación de carbón vegetal en el sustrato se ha probado con éxito, sin embargo su utilización es preferible en mezcla con arena o tierra, para garantizar la formación de un adobe (Murillo *et al.*, 2003).



Figura 7.2. Plantas de acacia (*Acacia mangium*) enraizada en bandeja, con un adobe suficiente para ser llevada a campo.

El pellet ha dado buenos resultados en el enraizamiento directo de estaquillas de *Tectona grandis*, *Hieronyma alchorneoides* y *Vochysia guatemalensis*. El objetivo es el de poder eliminar el trasplante (estrés y costos) que se requiere cuando se pone a enraizar las estaquillas en las bandejas plásticas. Sin embargo, la opción del pellet debe todavía refinarse para las demás especies, ya que una baja tasa de enraizamiento (<70%) sería antieconómico en este sistema (la unidad de 50 mm de diámetro cuesta alrededor de US\$ 0,1, mientras que el pellet de 36 mm tiene un costo de US\$0,05). En aquellos casos donde se obtenga una tasa de enraizamiento inferior al 70%, deberá entonces promoverse el enraizamiento inicial de las estaquillas en bandejas plásticas (de 120 a 200 unidades), durante unas 2 a 3 semanas como máximo (Murillo *et al.*, 2003). Para luego trasplantar al pellet, únicamente aquellas estaquillas que han logrado iniciar con la aparición de sus primeras raíces (ver Figura 7.3).





Figura 7.3. Plantas de melina (*Gmelina arborea*) enraizadas, trasplantadas en pellets de 50 mm de diámetro.

Los pellets pueden también ser preparados el día anterior a la siembra, con el fin de lograr una mejor consistencia y tamaño. La ahoyada en el pellet sí debe ser realizada pocos minutos previos a la siembra de las estaquillas.

En el mercado es posible conseguir una serie de productos orgánicos que pueden ser utilizados en la desinfección del sustrato y las estaquillas. Uno de los más conocidos es el Kilol (5 cc/l) o el Biocto (3 cc/l), que pueden diluirse y aplicarse con bomba de espalda, procurando mojar generosamente los pellets previo a la siembra de la estaquilla. Este producto debe aplicarse de manera preventiva al menos 1 vez al inicio de cada semana (Murillo *et al.*, 2003; Badilla *et al.*, 2000).

### 7.3. El riego en el invernadero.

El riego en el invernadero debe ser preferiblemente nebulizado y automático. Si se trabaja con bandejas plásticas y un sustrato de tierra:arena (1:1), un programa de riego adecuado debe mojar desde las 7 u 8 am, durante un minuto cada hora hasta las 3 ó 4 pm. En días muy soleados, calurosos o ventosos, el riego deberá aumentar su frecuencia a aproximadamente cada 30 minutos. En los días lluviosos y con una alta humedad relativa, el riego debe disminuir su frecuencia a una vez al día o quizá cada dos días. Con esto se busca eliminar un exceso de humedad en el medio de enraizamiento. En caso de no contar con un sistema de riego, se aplica en forma manual con ayuda de una bomba de espalda. Esto implica una importante dedicación de jornales en los días calurosos. Si se realiza el enraizamiento en pellets, entonces el riego debe disminuir considerablemente, hasta 1 mojada/día con una duración de 30 segundos a 1 minuto. Se ha observado en la Zona Norte de Costa Rica, que durante periodos de mal tiempo con alta pluviosidad y humedad relativa, los pellets pueden inclusive mojarse cada 2-3 días. Mientras que en días muy soleados y calurosos deben mojarse hasta 3 veces/día. En caso de tener fallas con el sistema de riego automático, una posibilidad es la de utilizar una bomba de espalda mojando generosamente por unos 10-20 segundos cada bandeja (Vallejos *et al.*, 2010; Xavier *et al.*, 2009; Murillo, 2005; Chacón y Murillo, 2005; Murillo *et al.*, 2003).

### 7.4. Preparación de las estaquillas.

La identificación de todas las estaquillas de un mismo árbol o clon debe mantenerse con

sumo cuidado. Este es uno de los aspectos más importantes de todo el proceso, ya que no debe nunca mezclarse material procedente de diferentes clones. Por lo tanto, es recomendable establecer una organización del personal y del equipo (baldes, pellets, bandejas, libretas de apuntes, marcadores, paletas de identificación, etc), de modo que se garantice que el material de cada árbol o clon se procesará de manera independiente y debidamente identificado durante todo su procesamiento.

Las estaquillas que vienen del tocón tienen un largo aproximado de 20 cm para evitar que sufra un estrés hídrico severo o se marchiten. En el invernadero, las estaquillas se cortan hasta dejarlas de un tamaño de unos 5-8 cm, procurando que incluyan preferiblemente un solo nudo (Mesén, 1998). Debe procurarse no eliminar el ápice o yema terminal, ya que se estimula a la planta a seguir produciendo brotes. Lo cual puede repercutir posteriormente en la obtención de plantas en campo que requieren de podas tempranas de formación o de eliminación de ramas bajas. Se ha encontrado en la mayoría de las especies una tasa mayor de enraizamiento con la segunda estaquilla dentro del brote (Badilla *et al.*, 2000). Pero si se espera hasta que el brote alcance las dos estaquillas, puede significar un atraso en la velocidad de propagación y una lignificación mayor en la segunda estaquilla potencial. Por lo general no se recomienda propagar las estaquillas muy lignificadas o cercanas a la base del brote, ya que presentan mayor dificultad para enraizar. En *Gmelina arborea* puede observarse la aparición de un pequeño "duramen" en la estaquilla como indicador del proceso de iniciación del proceso de lignificación (Chacón y Murillo, 2005; Murillo *et al.*, 2003).

Las hojas deben ser eliminadas completamente, excepto las últimas dos, que se recortan hasta dejarlas aproximadamente a 1/3 de su lámina foliar. Sin embargo, si en el área de enraizamiento se observa la aparición de musgo en la superficie, es necesario permitir que aumente la entrada de luz mediante una reducción aún mayor de la lámina foliar. Esta técnica ha dado buenos resultados en enraizamiento de estaquillas de *Gmelina arborea*.

La preparación de las estaquillas debe realizarse siempre a la sombra y las estaquillas deben permanecer húmedas el mayor tiempo posible. La preparación de las estaquillas puede realizarse fuera del invernadero, bajo un cobertizo cómodo y bien ventilado. Por lo general, el ambiente dentro de los invernaderos es sumamente caluroso y húmedo, lo que limita al personal en esta importante labor, Toda la labor de preparación de las estaquillas, su desinfección, inmersión en el enraizador y siembra en la bandeja o pellet puede ser realizado fuera del invernadero.

En *Tectona grandis* se ha obtenido mejores tasas de enraizamiento, al utilizar el primer brote o cogollo que se produce de estaquillas recién enraizadas dentro del invernadero (a las 4 semanas). Este primer brote es mucho más delgado que el brote proveniente del jardín clonal y se adapta mejor a los pellets pequeños de 30 y 36 mm. Este material es mucho más delgado, sano y succulento, lo cual lo hace ideal para su propagación vegetativa, además de que acelera la tasa de propagación del programa. Cuando se aplica esta técnica, las estaquillas a las que se les podó su primer brote deberán permanecer al menos 1 semana más dentro del invernadero. En Córdoba (Colombia) se han aplicado y corroborado estas técnicas en la clonación de árboles adultos y la multiplicación de plántulas en *T. grandis* y *G. arborea* con resultados exitosos en cantidad y calidad (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Espitia, 2010) (Figura 7.4).

Mientras se están cortando las estaquillas, éstas deben permanecer en una solución con Kilol (5 cc/litro) con el fin de iniciar su desinfección. Las estaquillas pueden permanecer desde 2 hasta 30 minutos en esta solución. También pueden sumergirse en una solución basada en ajo (10 cc/l) durante unos 5 segundos.

Las estaquillas de especies que liberan gran cantidad de sustancias oxidantes, como las

del género *Vochysia spp*, deben permanecer en agua corriendo por al menos 1 hora. Una vez transcurrido este tiempo, se les debe cortar de nuevo un segmento en la base, ya que pueden haber sufrido ya una oxidación o cicatrización (Murillo *et al.*, 2003).



Figura 7.4: Miniestaquilla y planta de alta calidad producidas vegetativamente en invernadero para el establecimiento de plantaciones comerciales.

### 7.5. Uso del enraizador y siembra de las estaquillas.

Las estaquillas se extraen de la solución de desinfección y se dejan escurrir para eliminar el exceso de agua. Se prepara entonces un recipiente con el enraizador que puede ser del producto comercial AGRIROOT, Magic Root, Rootone, etc (para *Tectona grandis*, *Hieronyma alchorneoides*, *Ulmus mexicana* y *Vochysia spp*), que viene preparado en forma comercial en una dosis de un 1% ó 10.000 ppm de AIB (ácido indol-butírico). La mayoría de las especies no toleran una dosis tan alta y requieren no más de 0,2% ó 2.000 ppm (*Eucalyptus Spp*, *Cupressus lusitanica*, *Alnus acuminata*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, entre otras). En estos casos deberá buscarse un producto comercial que indique una dosis baja o conseguirse AIB puro y prepararse en estas dosis (diluido en alcohol). En el pellet o la bandeja se procede a hacer un hoyo donde se sembrará la estaquilla. Se introduce entonces la base de la estaquilla en el enraizador hasta lograr que el polvo blanco se adhiera. La estaquilla se sacude ligeramente para eliminar el exceso de enraizador y se siembra directamente en el hoyo hecho en el pellet o la bandeja. Una vez sembradas todas las estaquillas se deben mojar ligeramente con el sistema de riego que se esté utilizando (Figura 7.5) (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Murillo *et al.*, 2003). Se puede conseguir también en el mercado un estimulante para el enraizamiento que viene en una presentación líquida (combina el AIB con el ácido naftalenoacético o ANA) y se puede aplicar el producto directamente a los pellets previo a la siembra, incluso el agua con la que se mojan y hacen crecer los pellets.



Figura 7.5. Estaquillas en proceso de enraizamiento

### 7.6. Programación de la producción.

El sistema de enraizamiento requiere de aproximadamente 2-3 semanas dentro del minitúnel y de 2 a 4 semanas en la zona de desarrollo final y aclimatación (*Tectona grandis*, *Hieronyma alchorneoides*, *Ulmus mexicana* y *Vochysia spp*). Con algunas especies como *Hieronyma alchorneoides* y *Tectona grandis* es preferible realizar la propagación en dos fases: 3 semanas en bandeja plástica con sustrajo arena (fase de enraizamiento), se transplanta al pellet y se mantiene dentro del minitúnel por una semana adicional, para finalmente pasar a la zona de desarrollo y aclimatación (2 a 4 semanas). En *Cupressus lusitanica* y otras coníferas puede tardar hasta 8 semanas el enraizamiento. Todo el proceso se prolonga entonces por 5 semanas (*Ulmus mexicana* y *Gmelina arborea*), 6-8 semanas (*Tectona grandis* y *Acacia mangium*), 8-12 semanas (*Vochysia guatemalensis*, *Terminalia amazonia*, *Hieronyma alchorneoides*, *Ulmus mexicana* y *Cupressus lusitánica*). En pruebas recientes, se ha aumentado la sobrevivencia y enraizamiento al aplicar un estimulante vía foliar (enraizador) a los 8 y 15 días de sembrada la estaquilla en la bandeja (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Murillo *et al.*, 2003; Murillo *et al.*, 2001a; Sánchez y Murillo, 2000; Mesén *et al.*, 1996).

Por lo general aparece primero la brotadura en la estaquilla (2-3 semanas en casi todas las especies, 5 semanas en *Cupressus lusitanica*) y luego continúa con la aparición de la raíz. En algunos casos, la aparición de la raíz ocurre hasta varias semanas después retrasando el proceso. El uso de un fertilizante foliar alto en fósforo (FONUTREN u otro) puede ser empleado dentro del invernadero, una vez que se detecte la aparición del brote, para tratar de acelerar la conformación final de la estaquilla. Los productos AGRI-GRO y CARBO-VIT (1 litro/estación = 55 gals), así como CROP+ y NPK o CITOZYME (1/2 litro/estación) se pueden conseguir en el mercado. Sobre el uso de estos productos y la frecuencia de aplicación, se requiere aún de mayor validación, ajuste y experimentación (Murillo *et al.*, 2003).

### 7.7. Efecto de la época del año.

De acuerdo con Murillo *et al.* (2003), cuando se trabaja con los jardines clonales a plena exposición al ambiente, se ha observado que por lo general durante la época seca el jardín clonal no logra alcanzar una tasa de producción de brotes satisfactoria. Este fenómeno es especialmente marcado en especies caducifolias, que entran en un período de latencia natural donde disminuye de manera importante todo su metabolismo. Sin embargo, no se han desarrollado experiencias suficientes con la posible aplicación de programas de riego en el jardín clonal, con el fin de contrarrestar este efecto. En estos casos, es preferible permitirle a las plantas un período de descanso y reposición durante la parte del año en que no estarán sometidas a una intensa producción vegetativa. Sin

embargo, hoy día las tecnologías de producción y manejo de minijardines clonales en ambiente protegido, han permitido superar notablemente estas dificultades en la mayoría de las especies forestales.

### 7.8. Prevención fitosanitaria.

Cada vez que se obtiene una nueva cosecha de estaquillas enraizadas del minitúnel, toda el área debe limpiarse minuciosamente con agua y jabón. Después debe limpiarse con alcohol todas las paredes internas con el fin de eliminar posibles patógenos. Debe recordarse que este es un medio ideal para la proliferación de hongos y otros patógenos, por lo que deben seguirse todas las medidas posibles de desinfección y prevención. Si se han utilizado bandejas plásticas, entonces deberán lavarse cuidadosamente con agua y jabón después de trasplantado el material. Las bandejas deberán también ser desinfectadas con alcohol antes de ser utilizadas nuevamente. Con especies muy sensibles a los patógenos como la melina, se debe realizar cada semana una aplicación de un fungicida/bactericida dentro del invernadero con fines de prevención de problemas fitosanitarios (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Espitia, 2010; Murillo *et al.*, 2003). Se debe procurar alternar diferentes productos con el fin de lograr un mayor espectro de cobertura. En caso de no poderse utilizar productos sintéticos, es posible conseguir hoy día en el mercado algunos productos de origen orgánico a base de ajo y otros a partir de extractos de semilla de cítricos (Kilol y el Biocto). El uso experimental de *Trichoderma utile* (2 kg/estación= 55 gals) ha permitido una limpieza de musgos y algas en los sustratos de los minijardines clonales, en los pasillos, y en toda el área de invernadero en general. Su utilización preliminar ha permitido inclusive reducir los efectos del complejo del mal de talluelo (*damping off*) en muchos invernaderos. Se estima que el perfeccionamiento en el uso de este tipo de biocontroladores, permitirá avanzar en la prevención y manejo de problemas fitosanitarios en los sistemas de producción clonal forestal. De particular importancia en el manejo de minijardines clonales de melina, una de las especies más sensibles a los patógenos.

En minijardines de teca aparece con frecuencia ataques del ácaro conocido como la arañita roja (*Tetranychus urticae*), que se ubican en el envés de las hojas. La utilización a escala experimental de la bacteria *Bauveria spp* ha resultado ser muy exitosa en su control.

### 7.9. Control de calidad del material a plantar.

En la fase de vivero es donde se deben aplicar los criterios más estrictos de control de calidad. Las pérdidas en campo por haber plantado material de baja calidad, serán mucho mayores que las que puedan ocurrir en la fase de invernadero. Por tanto, es vital que el material que se envíe a plantar esté en condiciones óptimas de sobrevivir y desarrollarse bien en campo. Las técnicas de propagación vegetativa permiten acelerar la producción masiva de plantas, pero desarrollan material de menor tamaño y en estado juvenil. Esto implica la necesidad de incluir un programa y acciones de control de calidad en dos fases: **a)** al finalizar el enraizamiento, en el momento del trasplante al Jiffy o pote; y **b)** al finalizar la fase de aclimatación, previo al despacho final a campo. En la primera fase deben eliminarse todo tipo de plantas con defectos visibles como torceduras de tallo o raíz, débil brotadura, presencia de hongos o alguna quema leve en el tallo, folias amorfas o dispares en tamaño en teca y melina, tamaño muy pequeño, principalmente. Una vez trasplantadas continúan con su fase de desarrollo y aclimatación. En esta segunda fase, las plantas deben presentar al menos de dos a tres pares de hojas verdaderas, buen estado fitosanitario, una altura de 8 a 10 cm, vigorosas, una masa radical visible y saludable, folias completas y en parejas del mismo tamaño (teca y melina), sin deficiencias nutricionales visibles, sin pérdida del meristemo y sin evidencia de problemas fitosanitarios. El proceso de control de calidad debe ser por tanto estricto en la fase de producción en invernadero y eliminar todas aquellas plantas que no

reúnan estas condiciones. Las primeras experiencias en Costa Rica y Colombia registran una eliminación de hasta un 10-15% en la primera fase (transplante a Jiffy o tubete) y otro 10% del material que ya ha superado la fase de transplante y se localizan en la fase de desarrollo y aclimatación (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Murillo *et al.*, 2003).

### 7.10. Área de aclimatación del material a plantar.

Muchos autores (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Vallejos *et al.*, 2010; Xavier *et al.*, 2009; Murillo, 2005; Chacón y Murillo, 2005; Murillo *et al.*, 2003; Murillo *et al.*, 2001a y 2001b; Mesén, 1998; Zobel, 1993), coinciden en señalar que como fase final del proceso de propagación y preparación del material para ser llevado a plantación, se deben aclimatar las plantas (excelentemente identificadas) en un espacio fresco y amplio, que les permita endurecerse y desarrollarse para mejorar su establecimiento definitivo en el campo. Este espacio debe evitar el paso de animales, controlar el efecto de vientos y lluvias fuertes y permitir el paso parcial de la luz, que en forma gradual se les irá eliminando en un periodo de unas 2 a 4 semanas, dependiendo de tasa de desarrollo de la especie. Por lo general se construyen instalaciones simples con postes de madera, serán u hojas de palma en el techo y plástico o cedazo en la parte de las paredes. Una a dos semanas previas al despacho final, se acostumbra dejar las plantas a plena exposición de la luz solar, con el fin de garantizar un endurecimiento y lignificación suficiente para sobrevivir en su establecimiento inicial en campo. En Costa Rica y Colombia (Gatti *et al.*, 2011; Suárez y Gatti, 2011; Espitia, 2010; Murillo, 2005; Chacón y Murillo, 2005; Murillo *et al.*, 2003) se ha venido practicando en especies como teca, melina y acacia la reducción con tijera de la mitad del área foliar en las plantas en esta fase final de aclimatación. Con esta técnica se logra prevenir una deshidratación severa inicial, se aumenta la lignificación y se ha disminuido considerablemente la mortalidad en los primeros 30 días.

### 7.11. Importancia de la validación de los clones.

Los clones seleccionados fenotípicamente deben ser evaluados en campo para verificar su superioridad genética en distintos ambientes. Debe tenerse presente que la selección inicial no garantiza su buen desempeño en todas las condiciones de sitio. Esta evaluación es vital para poder elegir los mejores 20 clones comerciales, con base en su calidad de fuste y rendimiento. Estos ensayos clonales se deberán establecer, en la medida de lo posible, en al menos 3 sitios representativos de las áreas a reforestar por la organización o empresa. Los ensayos clonales se establecen en un diseño experimental de Bloques Completos al azar, donde cada clon estará representado por seis plantas (rametos) dentro de cada bloque. Por lo general, estos diseños se establecen con seis bloques, por tanto, cada clon tendrá 6 bloques x 6 plantas/bloque = 36 plantas/clon. Para mejorar la eficiencia en la evaluación de los clones, se acostumbra a distribuir aleatoriamente dentro del bloque las seis plantas de cada clon en tres parejas. Se recomienda que el tamaño de cada bloque no supere los 2500 m<sup>2</sup>, con el fin de garantizar condiciones ambientales homogéneas para todos los clones a evaluar. Esto significa que no es recomendable evaluar más de 35 a 40 clones simultáneamente. En caso de contar con una colección genética mayor, se acostumbra dividir la colección en subgrupos de 35 clones y se mantiene un grupo de 5 clones comunes a todos los subgrupos, junto con al menos dos materiales testigo o semilla comercial de comparación. En la Tabla 7.1, se relacionan las características más importantes a evaluar en los ensayos clonales durante los siete primeros años (Murillo *et al.*, 2003).

Tabla 7.1. Caracteres a evaluar en los ensayos clonales.

Edad (años)	Caracteres a evaluar
1	Altura total (m) y cantidad de ramas en el primer metro o primera troza

2	Altura total, DAP, características cualitativas
3 ó 4	Altura total, DAP, características cualitativas y propiedades de la madera
5	Altura total, DAP, características cualitativas
7	Altura total, DAP, características cualitativas y propiedades de la madera.

### 7.12. Espaciamiento inicial de la plantación clonal.

La tecnología de reforestación clonal impone una serie de ventajas que propician la modificación de las técnicas de establecimiento y manejo de las plantaciones. Una de las más importantes es que al ser todos los individuos de muy alta calidad y casi idénticos, los raleos pasan a ser necesarios únicamente desde el punto de vista del manejo de la densidad. Esto es particularmente válido cuando los objetivos sean la producción de madera sólida, lo que implica que los raleos podrán ejecutarse de forma sistemática, facilitando enormemente esta labor. Al garantizarse que la mayoría de los árboles tengan ahora buenas características para su uso industrial, los silvicultores buscan reducir el número de árboles a plantar/ha para disminuir los costos de plantación y mantenimiento. Esto ha motivado la revisión del espaciamiento inicial, pero también el esfuerzo de fomentar un crecimiento más rápido del diámetro, con el fin de lograr que alcance dimensiones comerciales al momento del primer raleo (Espitia *et al.*, 2011; Espitia *et al.*, 2010b; Murillo *et al.*, 2003).

Con base en la experiencia en Costa Rica y en conversaciones con silvicultores experimentados, se sugieren los siguientes 5 espaciamientos para ser evaluados:

- a) 3m x 4m (833 árboles/ha)
- b) 4m x 4m (625 árboles/ha)
- c) 4m x 2,5m ( 1000 árboles/ha)
- d) 3m x 5m (667 árboles/ha)
- e) 4m x (2,5m x 2,5m) (1230 árboles/ha): método de la doble hilera, donde se plantan en sistema de pata de gallo o tresbolillo dos hileras juntas a 2,5m separadas por un callejón de 4m.

Este ensayo está diseñado para utilizar 4 clones, donde cada clon será considerado como un bloque. Cada espaciamiento es evaluado por medio de una parcela o unidad experimental de 81 árboles (9 x 9), cuya parcela útil interna tendrá 25 árboles (5 x 5) y 2 hileras de borde, con el fin de garantizar que la parcela útil exprese el efecto del espaciamiento en el crecimiento de los árboles.

En este ensayo se evalúa:

- ✓ Costo del establecimiento.
- ✓ Frecuencia y costo de control de malezas.
- ✓ Frecuencia y costo de podas y deshijas.
- ✓ Crecimiento anual en DAP, altura total, diámetro de copas (en dos direcciones)
- ✓ Calidad del fuste y en especial, número de ramas a los 2,5 y 5 m.

El objetivo es poder encontrar el espaciamiento que optimice costos, crecimiento, calidad

del fuste, volumen/ha y DAP al momento del primer raleo. Con este número de árboles/espaciamento se tendría entonces una superficie por clon o bloque de 4.951,1 m<sup>2</sup>, para un área total de 19.804 m<sup>2</sup>, como se muestra en la en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Diseño experimental del ensayo de espaciamentos de clones (Murillo, 2001).

Espaciamento	3mx4m	4mx4m	3mx5m	2,5mx4m	4m(2,5mx2,5m)
Tamaño y área de parcela (9x9 árboles)	27mx36m 972m <sup>2</sup>	36mx36m 1296 m <sup>2</sup>	27mx45m 1215 m <sup>2</sup>	22,5m x36m 810 m <sup>2</sup>	29.25mx22.5m 658.125 m <sup>2</sup>
Número de árboles/ha	833	625	667	1000	1230

### Bibliografía

- AHUJA, M.R. & LIBBY, W.J. 1993. Clonal Forestry II, Conservation and Application. Springer-Verlag, Berlín. 240 pp.
- BADILLA, Y., RODRÍGUEZ, L., MURILLO, O. Y OBANDO, G. 2000. Avances en la clonación de cebo, botarrama, pilón y almendro. Programa de mejoramiento y conservación genética de especies forestales. Reporte de Investigación No. 1. 11 p.
- CHACÓN, P; MURILLO, O. 2005. Análisis comparativo de la producción de minijardines clonales hidropónicos y jardines clonales en tierra de melina (*Gmelina arborea* Roxb.). Kurú: Revista Forestal 2(6):7 p.
- CORNELIUS, J.; UGARTE-GUERRA, L. 2010. Introducción a la Genética y domesticación forestal para la Agroforestería y Silvicultura. *Notas de clase*. Lima, Perú. Centro mundial para la agroforestería (ICRAF). 124 p.
- ESPITIA, M. 2010a. Selección de arboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea roxb*) y acacia (*Acacia mangium willd*) en el departamento de Córdoba – Sexto Informe de Avance. Documento impreso. Montería, dic/15/2010. 116p.
- ESPITIA, M., MURILLO, O., CASTILLO, C. 2011. Progreso esperado en la selección de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba (Colombia). En memorias impresas. ISSN 2248-6674. XLI Congreso Anual de COMALFI (Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal). Universidad del Tolima - Ibagué (Tolima) 21, 22 y 23 de septiembre/2011. 136p.
- ESPITIA, M.; MURILLO, O.; CASTILLO, C. 2010b. Ganancia genética esperada en la selección de teca (*Tectona grandis* L.) en Córdoba (Colombia). Revista Colombia Forestal. Vol.13, Número 2: En impresión.
- GATTI, K.C., SUAREZ, I., ESPITIA, M., TOBAR, D. 2011. Producción de plántulas por miniestacas de *Tectona grandis* Linn F., *Acacia mangium* Wild y *Gmelina arborea* Roxb. 50p. En Impresión.
- LADRACH, W. 2010. Manejo Práctico de Plantaciones Forestales en el Trópico y Subtrópico. Editorial Tecnológica. (en prensa). Cartago, Costa Rica. 67p.
- MASCARENHAS, A.F; MURALIDHARAN, E.M. 1993. Clonal forestry with tropical hardwoods. Capítulo 10. En: Ahuja & Libby (eds.) Clonal Forestry II. Conservation and Application. Springer-Verlag, Berlín, Alemania: 169-176.
- MESÉN, F. 1998a. Enraizamiento de estaquillas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. CATIE. PROSEFOR. Serie Técnica. Manual Técnico No. 30. Turrialba, Costa Rica. 36 p.
- MESÉN, F. Y TREJOS, E. 1998b. Propagación vegetativa del San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donn. Smith) mediante enraizamiento de estaquillas juveniles. Revista Forestal Centroamericana 21: 19-24.



- MESÉN, F., LEAKEY, R.R.B. Y NEWTON, A.C. 1996. Vegetative propagation of *Cordia alliodora* (Ruiz&Pavon)Oken: the effects of IBA concentration, propagation medium and cutting origin. *Forest Ecology and Management* 92: 45-54.
- MONTEUUIS, O; VALLAURI, D; POUPARD, C; HAZARD, L; YUSOF, Y; LATIP., A.W; GARCÍA, C; CHAUVIÈRE, M. 1995. Propagation clonale de teck matures par bouturage horticole. *Bois et Foret des Tropiques* 243: 25-39
- MORALES, W. 1999. Evaluación del potencial de enraizamiento de material juvenil de *Terminalia amazonia*. *Tecnología en Marcha* Vol 13: 175-179.
- MURILLO, O, OBANDO, G, BADILLA, Y. Y ARAYA, E. 2001a. Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de especies forestales del ITCR/FUNDECOR, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana* 16 (30): 273-285.
- MURILLO, O. 2001. Oferta para el desarrollo de un programa para FUNDECOR, de reforestación clonal en las zonas altas y bajas del Área de Conservación de la Cordillera Volcánica Central (ACCV) de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Centro de Investigaciones en Integración Bosque Industria (CIIBI). Cartago, Costa Rica. 29p.
- MURILLO, O. 2005. Hacia el cultivo de madera en Costa Rica. *El Tatascán* (Honduras) Vol 17.
- MURILLO, O., BADILLA, Y., Y OBANDO, G. 2001b. ¿Semillas versus propagación vegetativa: hacia dónde vamos?. *Revista Forestal Latinoamericana* 16 (30): 67-77.
- MURILLO, O.; ROJAS, J. L. Y BADILLA, Y. 2003. Reforestación Clonal. 2da edición. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 36 p.
- SÁNCHEZ, S. MURILLO, O. 2000. Potencial de reforestación clonal con ciprés (*Cupressus lusitanica*). *Revista Forestal Centroamericana* 32: 30-33.
- SUÁREZ, I., GATTI, K. 2011. Informe final del proyecto de investigación Paquete tecnológico para la producción de material de siembra de teca (*Tectona grandis* Linn. F.), melina (*Gmelina arborea* Roxb) y acacia (*Acacia mangium* Wild) para la Cadena Forestal de Córdoba. Documento impreso. 150p.
- VALLEJOS, J.; BADILLA, Y.; PICADO, F. Y MURILLO, O. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense*. Vol.33, Número 1: 105-119.
- XAVIER, ALOISIO; WENDLING, IVAR; DA SILVA, ROGÉRIO. 2009. *Silvicultura Clonal. Principios e Técnicas*. Editorial Universidad Federal de Vicosa. Vicosa, Minas Gerais, Brasil. 272 p.
- ZOBEL, B. 1993. Clonal forestry in Eucalypts. En: Ahuja & Libby (eds.) *Clonal Forestry II. Conservation and Application*. Springer-Verlag, Berlín, Alemania: 139-148.

## **Capítulo 8. Certificación genética de la semilla y creación de fuentes semilleras**

### **8.1 De la selección del árbol sobresaliente a su certificación genética**

Todo programa de mejoramiento genético inicia con la selección fenotípica de los árboles plus o árboles superiores, basada en su supuesto desempeño superior en relación con los mejores vecinos inmediatos (Resende, 2007; White *et al.*, 2007; Vallejos *et al.*, 2010). Su objetivo principal será siempre la creación de nuevas fuentes semilleras, de la mejor calidad genética posible, suficientes para abastecer la demanda local. Sin embargo, el mejoramiento genético se fundamenta en individuos que sean realmente superiores genéticamente, para posteriormente promover su cruzamiento y producir nuevos materiales que superarán a sus mismos progenitores. Normalmente, los árboles plus inicialmente seleccionados se localizan en fincas bajo diferentes condiciones de sitio, de manejo, de crecimiento, en general, bajo un fuerte efecto del ambiente que podría haber provocado la selección de individuos que fenotípicamente aparentan ser superiores, pero que realmente no lo son genéticamente (Marcucci *et al.*, 2010; Vallejos *et al.*, 2010; Murillo y Badilla, 2005; Zobel y Talbert, 1984). Dado que gran parte de las características de interés en el campo forestal son de carácter cuantitativo y que están afectadas por factores ambientales, la estimación del valor genético de los progenitores se hace con base en la estimación de parámetros estadísticos obtenidos a través de ensayos genéticos. La eficiencia de un programa de mejoramiento genético depende en gran medida de la habilidad de identificar los progenitores con mayor potencial genético en cada ciclo de mejoramiento. El establecimiento y mantenimiento de ensayos genéticos eficientes, junto con el uso de herramientas estadísticas adecuadas para el análisis de la información, son los elementos más importantes para lograr identificar los individuos con mayor potencial genético.

Esta situación obliga a todo programa de mejoramiento a realizar un proceso de comprobación de la superioridad genética del material inicialmente seleccionado. Para tal fin se han desarrollado procedimientos científicos basados en los diseños experimentales, donde todos los materiales son evaluados en las mismas condiciones ambientales, con varias repeticiones, en varios ambientes diferentes, con el fin de lograr evaluar cuáles de los árboles seleccionados son realmente superiores con base en su adaptabilidad y valor genético. Estos ensayos genéticos en campo constituyen el corazón de todo programa de mejoramiento genético y de creación de fuentes semilleras.

### **8.2 Definición y objetivo de la certificación de semilla.**

La certificación de semilla es un proceso integral que garantiza la calidad **genética, física, fisiológica y sanitaria**, mediante la evaluación, seguimiento y control del cumplimiento de normas técnicas, desde la inscripción de las personas y fuentes semilleras (área productora de semilla o viveros forestales) hasta la venta de la semilla sexual o vegetativa al reforestador (Balocchi y De Vier, 2004; Balocchi, 1982).

El programa de certificación de semilla forestal responde a una necesidad de la cadena con el fin de contribuir a aumentar la calidad y productividad de las plantaciones, para mejorar la competitividad y sostenibilidad del negocio forestal en el país. Cualquier programa de certificación de semillas y plántulas de vivero de especies forestales, tiene como objetivo fundamental ordenar, asegurar y legalizar la calidad integral y utilización de la semilla (sexual o vegetativa) para reforestación, con el propósito de aumentar la productividad y sanidad de las plantaciones forestales, de acuerdo a los requisitos, condiciones, necesidades y demanda del mercado y los consumidores actuales y potenciales de los productos de la madera, en un mundo globalizado.

En la mayoría de los países existen instituciones o programas nacionales que se encargan de la certificación de semillas. Así por ejemplo en Costa Rica, el programa lo desarrolla la Oficina Nacional de Semillas (según Ley 6289), En Colombia, la entidad responsable por la certificación de la semilla mejorada es el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA); adscrita al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). El ICA a través de la Resolución 002457 de 21 de julio de 2010 (ICA, 2010), ha definido y

actualizado recientemente los requisitos para la inscripción de personas o instituciones dedicadas a la producción y comercialización semillas para siembra y plántulas de especies forestales.

### **8.3 Importancia de los ensayos genéticos en la certificación y creación de fuentes semilleras.**

Los ensayos genéticos se han utilizado siempre como parte esencial de todo programa de mejoramiento genético. Existe una gran diversidad de tipos de ensayos y de diseños empleados para diferentes condiciones, que pueden conocerse en mayor detalle en el trabajo de Balocchi y De Vier (2004). Entre los más comunes se pueden mencionar tres de ellos:

- a) Ensayos de procedencias.** Se utilizan para evaluar la adaptabilidad y superioridad de material exótico vs el material local. Es de suma importancia en todo programa de mejoramiento genético, ya que podrían existir poblaciones en otros países o regiones con características genéticas que superen ampliamente a la fuente local.
- b) Ensayos de progenie o de procedencia/progenie:** Se utilizan en programas basados en la producción de semilla sexual, con el objetivo de evaluar individualmente la superioridad genética de cada familia (árbol plus), basado en su progenie. Los ensayos de procedencia/progenie evalúan simultáneamente, las mejores procedencias de semilla y los mejores individuos/familias dentro de cada procedencia.
- c) Ensayos clonales.** Se utilizan en programas basados en la producción asexual (clones) de semilla, con el objetivo de evaluar individualmente la adaptabilidad y desempeño de cada árbol plus (clon), basado en múltiples copias vegetativas del mismo individuo (conocidos como rametos).

Los ensayos genéticos se prestan para avaluar la magnitud de la variabilidad y heredabilidad de las características del árbol. En base a dichos antecedentes se puede decidir cuales características de la especie se justifica incluir en las siguientes generaciones de mejoramiento.

En general, las razones por las cuales todo programa de mejoramiento genético debe contemplar la realización de este tipo de ensayos son:

- a)** En el caso de ensayos de progenie, determinar el valor de mejoramiento de los progenitores a través de la evaluación de su descendencia, considerando aquellos caracteres de interés, tanto cuantitativos (tales como altura, diámetro, volumen) como cualitativos (forma del fuste, hábitos de ramificación, presencia de defectos del fuste, tolerancia a enfermedades, etc). De esta forma, se puede estimar el comportamiento de las poblaciones que se originen de las semillas obtenidas en los huertos semilleros.
- b)** Determinar la magnitud de diversos parámetros genéticos, tales como componentes de varianzas, covarianzas, heredabilidad, correlaciones de los caracteres seleccionados, habilidad combinatoria general y específica.
- c)** Estimar el grado de control genético y la ganancia genética realizada en cada semilla que se produzca en las siguientes generaciones.
- d)** Identificar familias o clones para usos específicos como, resistencia a enfermedades, alto peso específico de la madera, resistencia a deficiencias

edáficas, tolerancia a sitios con periodos secos prolongados (cambio climático), etc.

- e) Identificar genotipos o familias de alta producción para cada sitio (silvicultura de precisión), denominados como especialistas (con adaptabilidad específica), así como aquellos posibles genotipos capaces de adaptarse a una gran diversidad de sitios (alta plasticidad), conocidos como generalistas (con adaptabilidad general).
- f) Por último, la población generada a través del establecimiento de ensayos de progenie, es una fuente de selección de árboles genéticamente superiores para las futuras generaciones de mejoramiento (Balocchi y De Vier, 2004).

#### 8.4 Principios de la certificación genética forestal a través de los diseños experimentales

El diseño experimental es la herramienta fundamental que utiliza el mejorador para evaluar su material genético y lograr avanzar en su programa. A través de los ensayos genéticos se busca principalmente los siguientes objetivos: **a)** obtener parámetros genéticos de la población de mejoramiento (heredabilidades, varianzas, componentes de varianza, correlaciones genéticas, habilidad combinatoria, etc.); **b)** determinar o verificar el valor genético de los materiales (genotípicos y poblacionales), con el fin de establecer un ranking genético; **c)** estimar periódicamente el progreso genético alcanzado con el programa de mejoramiento; **d)** tomar decisiones de manejo de la población de mejoramiento y de la población comercial, **e)** eliminar rápidamente los genotipos de bajo rendimiento en una población de mejoramiento muy extensa; **f)** en algunas ocasiones, estimar productividad esperada utilizando los mejores materiales. Debe recordarse que por lo general, los diseños experimentales suelen ser eficientes para obtener parámetros genéticos o, para estimar productividad con los mejores materiales genéticos. Ambos grupos de objetivos no suelen ser compatibles experimentalmente (Murillo, 2006; Murillo y Badilla, 2004).

Un diseño experimental adecuado debe obedecer a los principios fundamentales de la experimentación: repetición, aleatoriedad y control ambiental. La importancia del número de repeticiones es capital, ya que con un bajo número de repeticiones la aleatoriedad es perjudicada o comprometida. Para lograr un adecuado control del ambiente debe garantizarse la homogeneidad dentro de estratos o bloques. Por lo que en general, se recomienda la utilización de diseños de bloques al azar y/o diseños en látices. La aleatorización y la repetición es el principio que logra una comparación objetiva sin sesgo entre los materiales a evaluar. Mientras que el control de gradientes ambientales y las repeticiones permiten reducir el error experimental medio. Un error experimental menor permitirá inferir como significativa una diferencia real pequeña entre promedios de tratamientos o entre valores genéticos (Resende, 2007).

**La repetición** se refiere al número de veces que un tratamiento (genotipo) aparece dentro de un experimento. Tiene por finalidad la estimación del error experimental, el aumento en el poder de las pruebas estadísticas como la prueba de "F", aumento de la precisión de los estimados de los tratamientos. En este último caso, cuanto mayor el número de repeticiones, menor será la varianza de la media de los tratamientos (Dias y Resende, 2001a). Un aumento en el número de repeticiones, incrementa también la exactitud de selección de los mejores genotipos en el ranking.

**La aleatorización como principio**, consiste en la disposición de los tratamientos al azar dentro del experimento, de modo que todas las parcelas tengan la misma posibilidad de recibir un determinado tratamiento. Este principio es fundamental para evitar factores sistemáticos como gradientes ambientales en el terreno que no sean visibles, que puedan beneficiar o poner en desventaja a alguno de los tratamientos. Lo que conduciría a conclusiones y estimaciones erróneas de los materiales en evaluación. Su mayor aporte es validar y dar confiabilidad en los estimados del error experimental y en la media de los tratamientos. En términos de evaluación genética y estimación de componentes de varianza, la aleatorización de los tratamientos es esencial como forma de evitar una posible correlación entre efectos genéticos y ambientales.

Situación que afectaría todos los supuestos básicos del modelo de estimación y predicción, que asume total independencia entre los efectos ambientales y genéticos. El uso de bloques aleatorizados, líneas y columnas en cuadrados latinos, por ejemplo, son estrategias de control ambiental que buscan reducir la variabilidad ambiental dentro de cada bloque, para garantizar condiciones homogéneas para todos los tratamientos (materiales), que deberán ser distribuidos en forma aleatoria dentro de cada bloque. El uso del análisis de covarianza, es también una manera de control de variables ambientales (Dias y Resende, 2001b).

**En relación al tamaño y distribución de las parcelas en cada bloque,** debe primero definirse que la parcela se considera como la **Unidad Experimental** en los ensayos genéticos y se define como el conjunto de plantas de una misma entidad (clon, familia, procedencia) localizadas dentro de un bloque. Como principio básico, las parcelas se distribuyen aleatoriamente dentro de cada bloque. Este principio permite disminuir posibles desvíos en su expresión genética (competencia intergenotípica), al evitar tener siempre al mismo competidor a su alrededor (positivo o negativo) en cada bloque.

Dependiendo de la estructura del diseño genético empleado, la parcela podrá tener desde 1 ("Single Tree Plot") hasta 8 ó más individuos. Los individuos de la parcela podrán ubicarse en forma contigua (típicamente en hileras), en minibloques, o distribuirse aleatoriamente dentro del bloque, creando subparcelas con una o varias plantas (Figura 8.1).

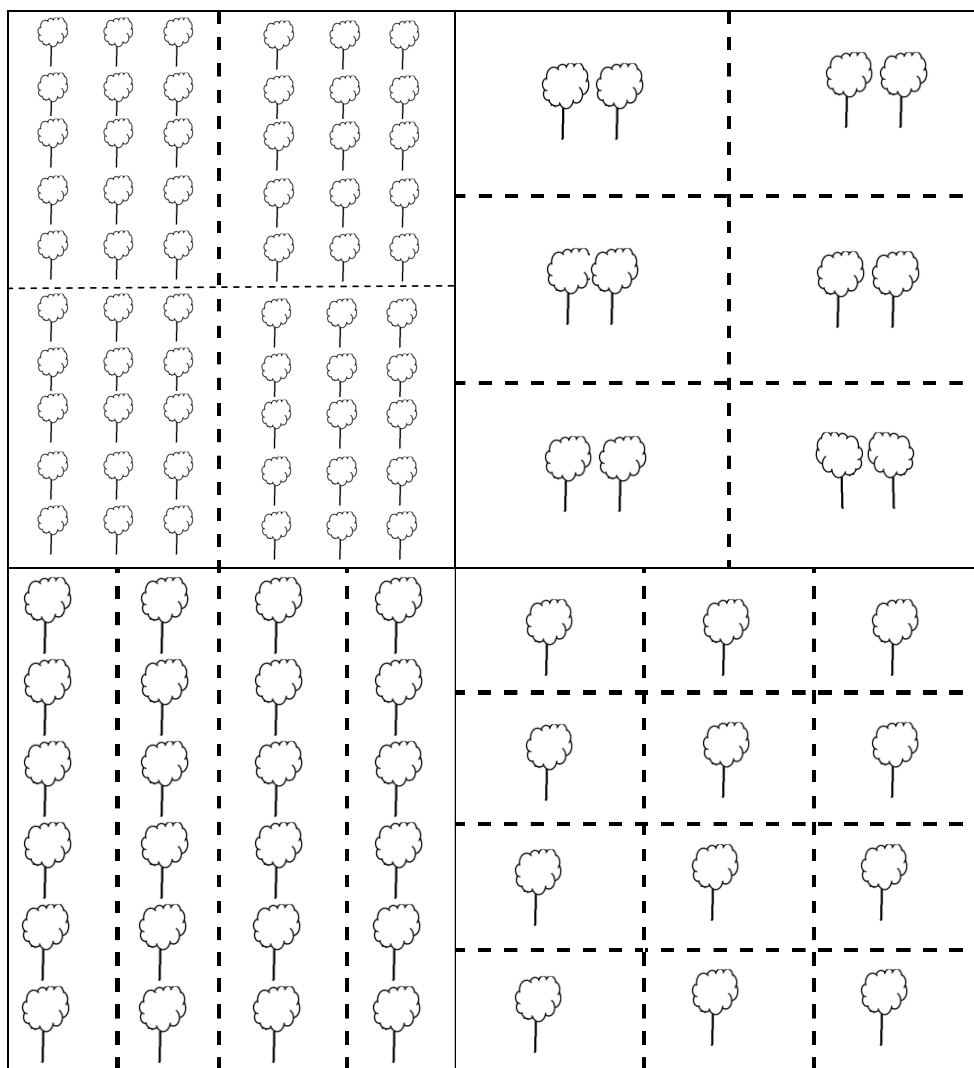


Figura 8.1. Diferentes tipos de parcela para la evaluación genética de materiales y su distribución espacial dentro del bloque. Arriba izquierda, minibloques clonales de 15 rametos; Arriba derecha, parejas aleatorizadas dentro del bloque; Abajo izquierda, hileras de 6 individuos; Abajo derecha, Árboles individuales (Single Tree Plots).

En la cooperativa de mejoramiento genético forestal creada en Costa Rica (GENFORES) se ha propuesto el diseño de la parcela subdivida en tres o cuatro parejas, distribuidas aleatoriamente dentro de cada bloque (Murillo y Badilla, 2005, ver Figura 8.2). Su establecimiento en campo requiere de sumo cuidado, sin embargo permite reducir el error potencial causado por la variación intrabloque no determinada previamente. Especialmente válido cuando no es posible encontrar sitios bien homogéneos para establecer los ensayos genéticos, o también, cuando se evalúan muchos materiales simultáneamente, lo que obliga al uso de bloques muy grandes. Balocchi y De Vier (2004) sugieren no emplear bloques mayores a 0,25 ha., con el fin de disminuir la variabilidad intrabloque. Este diseño permite realizar un raleo silvicultural de un 50% de los individuos en el ensayo genético sin afectar su estructura genética. En la evaluación genética de especies con ciclos de cultivo de más largo plazo, como la teca (*Tectona grandis*), es necesario postergar la selección y definición del ranking genético, hasta obtener una mayor expresión de los materiales de al menos 6 años de edad. Plazo de tiempo en el que se hace necesario realizar un raleo silvicultural para disminuir la competencia, que podría afectar la estructura del ensayo si no ha sido previamente planeado. Con la aplicación del raleo (aproximadamente a los 4 años de edad), se logran varios objetivos: **a)** se simula el manejo de la competencia tal y como ocurre a nivel operativo; **b)** se reduce el desbalance inicial provocado por la pérdida de individuos (mortalidad); **c)** cada parcela estará ahora representada en el ensayo por su mejor 50%, generando mejores estimados de valor genético; **d)** a partir del raleo, el ensayo se puede utilizar como un huerto semillero; **e)** de aquí en adelante, el ensayo es análogo al diseño de un árbol por parcela (Single Tree Plot) con todas sus ventajas conocidas.

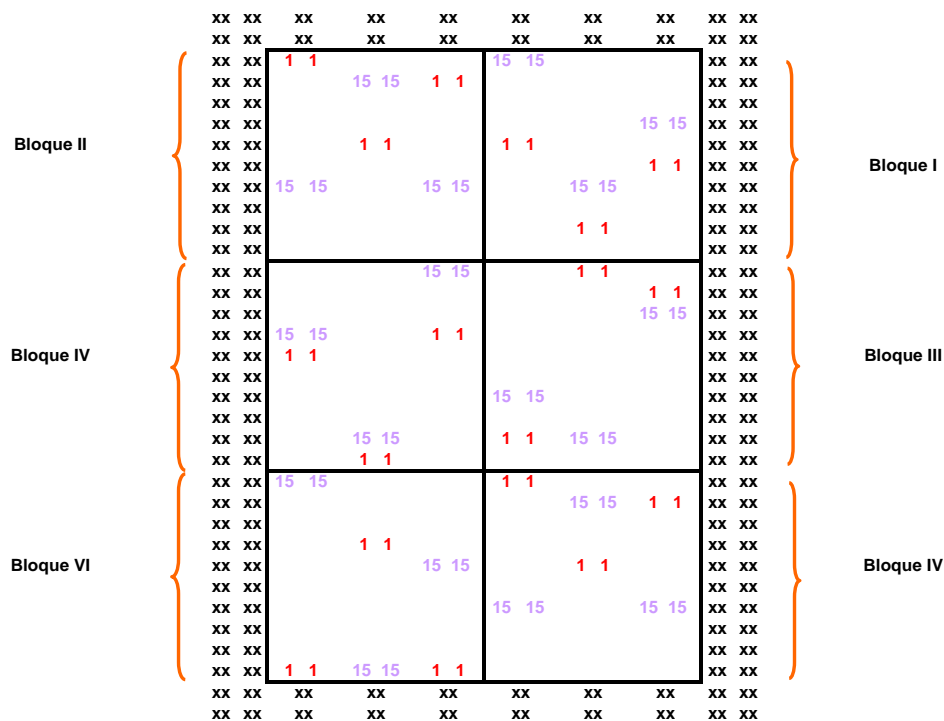


Figura 8.2. Diseño genético de bloques completos al azar utilizado por GENFORES (Murillo y Badilla, 2004). La parcela de 6 árboles está subdivida en tres parejas distribuidas aleatoriamente dentro de cada bloque.

**¿Superior genéticamente, pero dónde?** Bien conocido es el fenómeno de la evaluación de la adaptabilidad y superioridad del material genético en condiciones ambientales específicas o generales (Resende, 2007; Zobel y Talbert, 1984). Término que se le conoce como interacción Genotipo x Ambiente y puede ocasionar graves problemas al seleccionar y evaluar los materiales en una sola localidad y luego transferir la semilla a sitios con condiciones ambientales significativamente diferentes. Un programa de mejoramiento y creación de fuentes semilleras, debe ser sumamente cuidadoso en este aspecto. **La semilla mejorada no debe moverse comercialmente de una región a otra, sin una previa validación de su adaptabilidad, estabilidad y comportamiento superior esperado.**

Por tanto, los ensayos genéticos deben ser cuidadosamente planeados, de modo que intenten evaluar las colecciones genéticas de las regiones o condiciones ambientales representativas de los ambientes donde se proyecte utilizar la semilla comercial futura. De manera práctica, lo que se acostumbra es evaluar las colecciones en al menos 2 sitios contrastantes en sus condiciones ambientales (sitios secos vs con periodo lluvioso prolongado; suelos ácidos vs suelos neutros; sitios bajos vs sitios a mayor altitud; etc.).

De manera ideal, los ensayos deberán ser repetidos en al menos 2 años diferentes. Bien conocido es el fenómeno del año lluvioso vs el año con un periodo seco más extendido. El cambio climático es una realidad y debe ser prevenida a la hora de planear los ensayos genéticos que permitan a futuro certificar la adaptabilidad de la semilla. Con especies forestales, con un ciclo de crecimiento lento y por tanto de evaluación genética largo, es esencial tener presente y prevenir los procesos de cambio climático.

**¿Cuántas plantas son suficientes para evaluar un clon o una familia?** Para lograr evaluar y certificar correctamente y en forma suficiente el potencial genético de un material seleccionado, debe dársele la oportunidad de expresar todo su potencial, que estará en función de qué tan amplia sea su variabilidad genética. Esto significa que no será igual evaluar un clon, que es un único genotipo, a evaluar una familia a través de su progenie (semilla sexual) con una amplia diversidad genética. Así también, no será igual evaluar la capacidad de crecimiento en volumen de un genotipo vs la evaluación de la calidad de sus ramas. Certificar la superioridad en volumen o crecimiento en general, es sumamente complejo en el caso de las especies forestales. Debe recordarse que el volumen y el crecimiento de los árboles se encuentran bajo un fuerte efecto de las condiciones ambientales donde crezca. Esto significa que podrá crecer mucho o poco, en función de la competencia (espaciamiento), nutrición, clima, etc. Por tanto su heredabilidad o control genético es por lo general muy bajo. Por el contrario, la rectitud del fuste de un árbol o la presencia de ramas finas que se insertan en ángulo recto en el tronco, tienen muy poco efecto de las condiciones de competencia de la plantación. Por tanto, registran heredabilidades muy altas (Badilla & Murillo, 2009; Murillo y Badilla, 2005).

De manera general, se acostumbra normar con base en el criterio de certificación del volumen, por ser el carácter de mayor dificultad. Por tanto, para lograr comprobar la superioridad genética de un material en volumen, con una heredabilidad esperada de 0,25 y con una exactitud o precisión de un 90%, se recomienda incluir en los diseños de campo al menos 30 rametos de cada clon; al menos 40 progenies por familia si se ha obtenido por polinización controlada, y al menos 64 progenies por familia si la semilla proviene de polinización abierta (Resende, 2007). Este número de plantas debe a la vez dividirse entre el número de sitios o localidades donde se evaluarán las colecciones. Sin embargo, para un único sitio no es recomendable plantar menos de 20 rametos (clones) o menos de 36 progenies (familias).

Finalmente y no menos importante, las plantas que se utilicen para evaluar las colecciones genéticas, deben ser **plantas representativas, vigorosas, con todas las características mínimas de calidad comercial requeridas para una planta que va a campo**. Esto significa, que para evaluar correctamente las colecciones genéticas, será necesario producir al menos unas 3 veces el número de plantas por clon o familia planeadas para el establecimiento de los ensayos genéticos. Del total de plantas producidas, se podrá proceder a seleccionar las de mejores condiciones físicas y serán las que debidamente rotuladas, una a una, se llevarán a los ensayos de campo. Dado que en todo ensayo es normal que ocurra algún grado de mortalidad, se ha establecido que los ensayos genéticos sean resembrados únicamente en los primeros 30 días de su establecimiento. De esta fecha en adelante, se considera que la mortalidad es ya una expresión de adaptabilidad del material evaluado. **No es recomendable por tanto, continuar resembrando posterior a los primeros 30 días**. Esto puede producir plantas de menor tamaño, que luego se vayan suprimiendo en relación con sus vecinos, y producir información inferior en crecimiento que la esperada si hubiera crecido en igualdad de condiciones. Como resultado, podría disminuir el valor medio de su familia o clon y provocar que se le ubique en el ranking por debajo de su verdadero valor genético causado por un error experimental (Badilla & Murillo, 2009; Murillo y Badilla, 2005).

**Tamaño del Bloque y número de clones o familias por ensayo.** Como se ha mencionado, la eficiencia de evaluación de los materiales disminuye en la medida que se utilicen bloques muy grandes o superiores a 0,25 ha (Balocchi y De Vier, 2004). En

bloques muy grandes se corre el riesgo de incluir variación ambiental (principalmente de suelo) intrabloque que es de difícil control. Esta variación interna en el bloque podría provocar un beneficio o perjuicio para el crecimiento de los materiales evaluados, según donde se localicen espacialmente. Si se mantiene este valor de 0,25 ha como una referencia, y bajo espaciamientos de máximo 4m x 4m, se llega a la conclusión de que en un mismo ensayo genético no es eficiente evaluar simultáneamente más de 40 a 45 clones o familias.

Cuando una organización tenga una colección genética con un número mayor de materiales, una opción es subdividir la colección en grupos de 40 y utilizar 5 comunes en todos los grupos. Estos 5 materiales comunes se plantan en todos los ensayos y su objetivo es intentar relacionar los valores genéticos entre los grupos.

**Es sumamente importante incluir material testigo o control.** Este material testigo o control tiene como función básica, permitir relacionar y estimar la ganancia genética esperada entre los materiales seleccionados y el material genético anterior al programa de mejoramiento genético. El material control es uno de los elementos clave en la certificación o verificación de la calidad genética del material que se pretende desarrollar y comercializar. En términos prácticos, permitirá contestar la pregunta ¿cuánto se logrará avanzar con este nuevo material en relación con lo que tenemos actualmente?. En programas de mejoramiento avanzados, los testigos utilizados son por lo general, el material genético de la generación anterior.

Dado que los materiales testigo deben ser representativos de la calidad genética anterior al programa que pretendemos desarrollar, se utiliza por regla general la mejor semilla comercial existente. En caso de no existir ninguna semilla comercial, se ha utilizado como testigo, una colecta amplia de semilla de rodales semilleros de la mejor calidad posible.

Ocurre con frecuencia **la duda de si un clon producirá más que una semilla** de rodales o de huertos semilleros. En estos casos, es muy conveniente utilizar como testigo semilla procedente del mejor programa de semillas que se tenga a la mano. Se ha planteado también la pregunta, de si será mejor utilizar mezcla de clones que los clones puros. Esta pregunta se puede resolver también al generar como testigo un lote de mezcla de no menos de 10 clones. Para tal caso, este lote debe entonces constituirse bien balanceado, de modo que todos los 10 genotipos tengan la misma representación o cantidad de rametos (Vallejos *et al.*, 2010; Murillo y Badilla, 2004; Balocchi y De Vier, 2004; Zobel y Talbert, 1984).

Incluir más de un testigo es por lo general muy conveniente y practicado en programas de mejoramiento genético bien estructurado. Los materiales testigo pueden ser de varios tipos y permitir contestar preguntas diferentes a las ya explicadas. Por ejemplo, un testigo de una colección de una empresa diferente, o un testigo de una procedencia de otra región o país. En fin, el concepto del testigo podría mejor comprenderse como un material genético de comparación. Su valor es sumamente alto en la certificación de la calidad genética de un programa de mejoramiento genético.

### **8.5 Conversión de los ensayos genéticos en áreas productoras de semillas (APS).**

Como puede claramente deducirse, la mayor parte de los ensayos genéticos pueden ser convertidos en fuentes semilleras directamente. Dependerá de su diseño espacial y principalmente de la distribución espacial de los materiales (parcelas), la facilidad en que pueda ser convertido en fuente semillera. Sin embargo, los ensayos genéticos no siempre pueden ser convertidos en fuentes semilleras. En el caso de programas de producción de semilla sexual, en la mayoría de los casos su tamaño no es suficiente para producir la cantidad o volumen de semilla demandado. A veces el sitio del ensayo genético no es el mejor para la floración y fructificación de la especie. Y finalmente, muchos de los ensayos



genéticos no cumplen con la norma de aislamiento requerida para evitar la contaminación por polen indeseable. En programas basados en la producción clonal, claramente los ensayos genéticos no son utilizados en la producción de semilla (asexual), por tanto, no se espera que los ensayos genéticos sean utilizados como fuente de germoplasma a escala comercial (Badilla & Murillo (2009).

El ICA (2010) en Colombia, considera y reconoce legalmente cuatro tipos de APS forestales, a saber: **a)** Huerto semillero genéticamente comprobado, **b)** Huerto semillero no comprobado, **c)** Rodal semillero y **d)** Fuente seleccionada. A continuación de relacionan los requisitos que debe reunir cada APS.

- a) Huerto semillero genéticamente comprobado:** dentro los requisitos más importantes que deben cumplir este tipo de área productora de semillas se tiene: **1)** La plantación puede ser originada a partir de semilla sexual o asexual; **2)** Seguir un diseño experimental verificable en campo; **3)** Estar aislado mediante la remoción de árboles indeseables de la misma especie o de otras especies con riesgo de cruzamiento, por lo menos en una franja de 200 metros al perímetro del huerto para reducir la contaminación por polen procedente de otras fuentes de germoplasma; **4)** ser manejado silviculturalmente para aumentar la producción de semilla y facilitar su recolección; **5)** Tener soporte documental técnico del plan silvicultural y de mejoramiento en donde demuestre el origen de la semilla, el manejo silvicultural y la depuración genética realizada para su validación, este respaldo debe ser medible y evaluable; **6)** Tener respaldo de pruebas de progenie y los resultados de éstas deben haber sido implementados en el huerto para su depuración genética.; **7)** Será avalada como semilla de huerto semillero genéticamente comprobado aquella cosechada posterior a la floración de los árboles remanentes de la depuración genética.
- b) Huerto semillero NO comprobado:** los requisitos más importantes son: **1)** La plantación puede ser originada a partir de semilla sexual o asexual; **2)** Seguir un diseño experimental verificable en campo; **3)** Estar aislado mediante la remoción de árboles indeseables de la misma especie o de otras especies con riesgo de cruzamiento, por lo menos en una franja de 200 metros al perímetro del huerto para reducir la contaminación por polen procedente de otras fuentes de germoplasma; **4)** ser manejado silviculturalmente para aumentar la producción de semilla y facilitar su recolección; **5)** Tener soporte documental técnico del plan silvicultural y de mejoramiento en donde demuestre el origen de la semilla y el manejo silvicultural para su validación, este respaldo debe ser medible y evaluable; **6)** Este tipo de fuente, podrá ser habilitado a la categoría de huerto semillero genéticamente comprobado, sí se establecen y evalúan pruebas de progenie y con base en sus resultados se realiza la depuración genética respectiva.
- c) Rodal semillero:** este tipo de fuentes semilleras deben cumplir con los siguientes requisitos: **1)** Ser un grupo de árboles vecinos de la misma especie, naturales o plantados con características fenotípicas deseables para uno o varios caracteres; **2)** Haber sido sometido a depuración genética a través de la remoción de los árboles fenotípicamente indeseables, demostrando una intensidad de selección mínima de 1:5; **3)** Estar compuesto después de la depuración genética como mínimo por 75 árboles seleccionados, debidamente identificados y marcados; **4)** Estar aislado mediante la eliminación y remoción de árboles indeseables de la misma especie o de otras especies con riesgo de cruzamiento, por lo menos en una franja de 200 metros al perímetro del rodal para reducir la contaminación por polen procedente de otras fuentes de germoplasma; **5)** Tener soporte documental técnico del plan silvicultural y de mejoramiento sobre el proceso de selección del rodal, el manejo silvicultural y las depuraciones genéticas realizadas, este

respaldo debe ser medible y evaluable; **6)** Un rodal semillero no podrá pasar a un tipo de área productora de semilla superior.

- d) Fuente seleccionada:** los requisitos más importantes son: **1)** Ser un grupo de árboles vecinos de la misma especie, naturales o plantados con características fenotípicas deseables. Como mínimo deberá estar compuesto por 30 árboles vecinos; **2)** Estar compuesta, por lo menos el 70% de la fuente seleccionada, por árboles en estado productivo, es decir que hayan alcanzado la madurez fisiológica y produzcan semilla; **3)** Una fuente seleccionada puede pasar a la categoría rodal semillero, si cumple con los requisitos establecidos en el numeral “c”; **4)** Si al momento de realizar el registro como fuente seleccionada, no se cumple con el número mínimo de árboles que hayan alcanzado su madurez fisiológica y produzcan semilla, se tendrá en cuenta el total de árboles en estado productivo.

Según Badilla & Murillo (2009), con los resultados de los ensayos de evaluación genética se obtienen los parámetros genéticos de la población de mejoramiento (Varianzas, covarianzas, componentes de varianzas, heredabilidades, correlaciones genéticas, diferencial de selección y ganancias genéticas realizadas, entre otras). Con esta información, por lo general, se procede a eliminar un 30 a 50% de los materiales inferiores. Mientras que el material que registre un rendimiento superior, permanece para conformar la población de progenitores que darán base a la segunda generación de mejoramiento mediante un diseño de cruzamientos controlados. Sus descendencias se evaluarán en ensayos de progenie de segunda generación, que tardarán unos 6 a 8 años en brindar la información genética. Estos ensayos se convierten en Huertos Semilleros de segunda generación o se clonan los mejores individuos, dependiendo de la estrategia de mejoramiento a seguir. Esta segunda generación de mejoramiento, por lo general, se espera obtenga aproximadamente otro 25% adicional en volumen y rendimiento, así como material mucho más homogéneo. De ésta manera continúan obteniéndose nuevas generaciones de mejoramiento cada 8 a 10 años, aportando nuevo material con una ganancia genética esperada de un 20 a un 25%.

## Bibliografía

- BADILLA Y. y MURILLO, O. 2009. Evolución de los sistemas de propagación clonal in vivo de teca en Costa Rica. En: I Congreso Internacional del Cultivo de teca. Universidad de Quevedo, Ecuador. 16-17 de setiembre, 2009
- BALOCCHI, C. 1982. Manual de Cruzamientos Controlados. CONVENIO MEJORAMIENTO GENÉTICO. U.A.CH. Empresas Forestales. Chile. 49p.
- BALOCCHI, CLAUDIO Y VIER, CRISTIAN DE. 2004. Manual de Ensayos Genéticos Forestales. Bioforest. Concepción, Chile. 69 p.
- DIAS, L.A.S. DOS; RESENDE, M.D.V. DE. 2001b. Estratégias e metodos de seleção. In: DIAS, L. A. S. dos. (Org.). Melhoramento genético do cacauero. Viçosa: FUNAPE, p. 217-287.
- DIAS, L.A.S. DOS; RESENDE, M.D.V. 2001a. Experimentação no melhoramento. In: DIAS, L. A. S. dos. (Org.). Melhoramento genético do cacauero. Viçosa: FUNAPE, p. 439-492.
- ICA. 2010. Resolución 002457 de 21 de julio de 2010: Por medio de la cual se establecen los requisitos para la inscripción de personas que se dediquen a la producción y comercialización de semillas para siembra y plántulas de especies forestales y se dictan otras disposiciones. 23p. <http://www.ica.gov.co/Normatividad/Normas-Ica/Resoluciones.aspx?page=4> (Consultado: Nov/15/2010)
- MARCUCCI, S.P.; GALLO, L.; ZELENER, N.; TORALES, S.; SHARRY, S. 2010. Aplicación de la biotecnología en la mejora y conservación de especies forestales. En: Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II. Parte V. Capítulo 5. Ediciones INTA - ArgenBio. 643p.
- MURILLO, O. 2006. Producción de semilla mejorada a gran escala en Costa Rica a través de GENFORES: modelo de vinculación Academia – empresa. En: I Curso Internacional sobre producción y conservación de semillas forestales. 21-23 Octubre 2006. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

MURILLO, O. y BADILLA, Y. 2005. ¿Qué es mejoramiento genético forestal?. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 14 p.

MURILLO, O y BADILLA, Y. 2004. Breeding teak in Costa Rica. En: IUFRO Meeting. Forest Genetics and Genomics. 1 – 5 de noviembre. Charleston, South Carolina, USA. [www.ncsu.edu/feop/iufro\\_genetics2004/proceedings.pdf](http://www.ncsu.edu/feop/iufro_genetics2004/proceedings.pdf)

RESENDE, M.D. V. DE. 2007. Matemática e Estatística na Análise de Experimentos e no Melhoramento Genético. Embrapa Florestas. Colombo, PR. 362p.

VALLEJOS, J.; BADILLA, Y.; PICADO, F.; MURILLO, O. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. Revista Agronomía Costarricense 34(1): 105-119.

WHITE, T.L.; ADAMS, T.; NEALE, D.B. 2007. Tree improvement programs-structure, concepts and importance. In: Forest Genetics. CABI Publishing. ISBN 9780851990835. London, UK. 702p.

ZOBEL, B Y TALBERT, J. 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley & Sons. New York, USA. 510p.

## Capítulo 9. Fuentes semilleras: tipos y categorías

### 9.1. Definición y conceptos.

En general son muchos los términos, conceptos y definiciones relacionados con las fuentes semilleras forestales. Tenemos diferentes categorías basadas en la calidad genética de la semilla producida, así como estrategias de desarrollo de nuevas fuentes semilleras a corto, mediano y largo plazo. Sin embargo con el objeto de entender y asimilar mejor este tema, sobresalen los conceptos que se relacionan a continuación (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; ICA, 2010; Rodríguez y Nieto, 1999; Ipinza, 1998; Murillo, 1992a; Murillo 1990; Zobel y Talbert, 1988).

**a) Fuentes semilleras.** En muchos casos es sinónimo de área productora de semilla (APS). Los términos fuente semillera o áreas productoras de semilla corresponden a nombres genéricos para designar un grupo o población de árboles de la misma especie, con características fenotípicas sobresalientes, comprobadas genéticamente o no, de los cuales se obtiene semilla sexual o clonal para siembra de plantaciones forestales comerciales. La fuente semillera puede corresponder a: **i)** una fuente identificada; **ii)** una fuente seleccionada; **iii)** un rodal semillero; **iv)** un huerto semillero NO comprobado y/o **v)** un huerto semillero comprobado genéticamente, y recientemente se ha incorporado el jardín clonal con todas sus modalidades. Dentro de cada una de éstas, pueden existir diferentes tipos o clases, por ejemplo: existen huertos semilleros de progenies y clonal. De igual forma existen rodales semilleros de bosque natural, de plantaciones y de unidades experimentales. En algunos casos, una fuente semillera proviene de una plantación que puede tener el doble propósito, producción de madera y semilla.

**b) Árboles semilleros.** Hace relación a un grupo de árboles generalmente distribuidos en forma separada en una plantación, en un bosque natural o árboles aislados, con características fenotípicas deseables superiores a los de la mayoría de la plantación o su entorno, que se usan como fuente temporal de semilla (en ausencia de árboles plus o élite de la misma especie) para siembra comercial o para iniciar un programa de mejoramiento. Por lo general implica la producción de semilla a un costo alto debido a que los individuos suelen estar geográficamente separados.

**c) Fuente identificada.** Son un grupo de árboles que, por ocupar poca área, o porque no reúnen un número suficiente de individuos aceptables por hectárea, no clasifican dentro de la categoría de fuente seleccionada, pero deben utilizarse temporalmente ante la ausencia de otras fuentes de mayor calidad genética. En esta categoría pueden encontrarse los siguientes casos: **i)** parcelas experimentales de un número limitado de árboles; **ii)** pequeños bloques de plantación; **iii)** ensayos genéticos o silviculturales de poca extensión y/o **iv)** pequeñas áreas de bosque natural con baja densidad de individuos.

**d) Fuente seleccionada.** Grupo de árboles vecinos de una misma especie, naturales o plantados, con características fenotípicas deseables, sobresalientes para uno o varios caracteres, con buen estado sanitario, utilizados para la producción de semilla, pero que no han sido depurados genéticamente mediante la eliminación de individuos indeseables. Constituye la categoría básica de un área productora de semilla.

**e) Rodal semillero.** Es una plantación o grupo de árboles de una misma especie, natural o plantada, nativos o exóticos, con características fenotípicas deseables, sobresalientes para uno o varios caracteres, tales como crecimiento, volumen, sanidad y forma del fuste; y que ha sido depurada mediante la eliminación de individuos indeseables y ha sido manejada para la producción de semilla. Un rodal semillero normalmente produce semilla de buena calidad, que se estima supera en un 5 a 8% a la semilla común (Murillo 1992a). Se utilizan los rodales semilleros como fuentes interinas mientras se desarrolla semilla de mayor calidad genética. Al utilizar semilla de una fuente conocida, como un rodal semillero, hay seguridad que la semilla no provenga de una fuente de baja calidad.

Entre sus mayores ventajas está la alta producción de volumen de semilla a bajo costo por localizarse en un solo sitio.

**f) Huerto semillero.** Es una plantación de árboles (clones o progenies) seleccionados, con pedigrí conocido, con arreglo espacial, aislada y manejada para eliminar o reducir la polinización de fuentes externas y para producir cosechas de semillas frecuentes, abundantes y fácilmente colectables. Cada árbol ha sido seleccionado rigurosamente basado en sus cualidades fenotípicas. En programas de mejoramiento genético avanzados, se ha logrado también comprobar la superioridad genética de la semilla que produce. Por tanto, la semilla producida por los huertos semilleros es de muy alta calidad genética, frecuentemente 20 a 25% superior que la semilla común.

**g) Semilla mejorada.** Es aquella semilla obtenida de huertos semilleros donde ha ocurrido polinización abierta o controlada sin contaminación de polen externo. La calidad genética de la semilla aumentará considerablemente una vez que se logra comprobar el valor genético de cada uno de los árboles que componen el huerto y, se han eliminado los genotipos inferiores, Esta categoría de semilla se le conoce como semilla certificada A (Costa Rica), semilla genéticamente comprobada o Semilla Forestal Calificada 1 (Perú).

**h) Población.** Es un grupo de árboles localizados en un mismo territorio dentro del cual se encuentran en contacto de apareamiento (polinización), con el respectivo intercambio de alelos. Por lo tanto, cada semilla formada proviene de la unión de gametos genéticamente diferentes y constituye generalmente un híbrido natural. Toda semilla obtenida de un árbol constituye una familia de hermanos medios, ya que tienen a la madre como progenitor común, mientras que el progenitor masculino es diferente y no se conoce. En la medida que el número de progenitores sea alto ( $N > 500$ ) y su origen diverso, se constituye en una unidad de base genética amplia y de gran importancia para la conservación y manejo de recursos genéticos de la especie.

**i) Origen.** El término origen hace relación exclusiva al área geográfica original del bosque nativo, donde crecieron los árboles progenitores de la semilla. Esto implica que el término origen se refiere únicamente a los sitios donde la especie ocurre en forma natural. Por tanto, se excluye la semilla que se pueda producir de sitios donde la especie ha sido introducida como una exótica. Por ejemplo, cuando se colecta semilla de un rodal o huerto semillero de teca en Puerto Libertador (Córdoba – Colombia), establecido con semilla introducida desde Myanmar (antigua Birmania), la procedencia o fuente semillera sería Puerto Libertador (Córdoba – Colombia), mientras el origen sería Myanmar.

**j) Procedencia.** Es un término útil que significa simplemente el lugar geográfico de donde se ha obtenido un lote de semilla. Sin embargo, dado que hoy día es común hablar de semilla procedente de especies exóticas como la teca, melina, *Acacia mangium*, pinos y eucaliptos, si debe tenerse especial cuidado de utilizar el término de procedencia, exclusivamente cuando la semilla procede de programas donde se garantice la existencia de una base genética amplia. Por tanto, preferiblemente de programas de mejoramiento genético, huertos semilleros, etc. De forma errónea es común encontrar la referencia “procedencia” a semilla colectada de grupos pequeños de árboles o de algún rodal, que no logran constituirse en una verdadera entidad genética debido a su estrecha base genética. En esos casos el término correcto debería ser fuente semillera. Las verdaderas procedencias, por tanto, si pueden mostrar diferencias genéticas importantes en adaptabilidad, crecimiento, resistencia a enfermedades, etc., dentro de una misma especie.

**k) Raza local:** Este término es de vital importancia en el desarrollo moderno de fuentes semilleras. Puede definirse como el producto final de un proceso de selección y adaptación de material genético de un número suficiente de individuos introducidos en un nuevo ambiente. Este es el caso de una especie exótica introducida correctamente (con una base genética amplia) en una región, donde han sido seleccionados y entrecruzados los mejor adaptados, y han logrado producir una nueva progenie o semilla local. Una raza local se constituye entonces en una nueva entidad genética creada artificialmente, a partir de material exótico introducido. Por lo general implica la introducción de procedencias de diferente origen, que se hibridizan en el nuevo ambiente y llegan a conformar una nueva entidad genética adaptada. Las razas locales (*land race* en inglés) han sido la estrategia exitosa para introducir nuevas especies en ambientes extremos, o para lograr expandir los cultivos donde en forma natural no era posible.

**I) Calidad de la semilla.** Aún cuando al referirnos a la calidad integral de la semilla de cualquier especie vegetal, se puede incluir la **calidad genética, física, fisiológica y sanitaria**; la FAO (2010), señala que la calidad de la semilla forestal (sexual o clonal) se puede referir a dos aspectos principales: **i)** La calidad **fisiológica de la semilla**, relacionada con los procesos de germinación y vigor de la semilla. Este tipo de calidad depende de factores como el manejo silvícola, la época y el método de recolección, la manipulación, tratamiento, empaque, almacenamiento y conservación de la semilla. **ii)** La calidad **genética**, que se refiere al grado o nivel de mejoramiento genético, combinación de genes deseables, potencial genético y expresión de los genes deseables en la semilla. La calidad genética de la semilla depende a su vez del manejo silvícola, aislamiento, características propias del rodal o huerto semillero, el número de árboles que intervienen en la polinización de los óvulos y el número de árboles madre utilizados como fuente. La calidad genética de las semillas también determinará la del rodal/huerto semillero que de ellas se obtenga para posterior colecta de semillas.

## 9.2. Importancia de las fuentes semilleras.

Entres los aspectos principales de importancia de las fuentes semilleras en la silvicultura moderna, se destacan entre otros los siguientes (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; Nieto *et al.*, 2007; MADR, 2007; Ipinza, 1998; Murillo, 1990; Zobel y Talbert, 1988):

- a) En Colombia el proceso de la certificación de semillas de cultivos, como una estrategia para incrementar la productividad, competitividad y sostenibilidad del sector agrícola, forestal, industrial y/o comercial se inició en el año 1953, cuando se vendieron aproximadamente 65 toneladas de semillas de maíz para siembra. En la actualidad hay alrededor de 100 empresas autorizadas para vender semilla certificada de muchas especies agrícolas y forestales.
- b) En el sector forestal colombiano el desarrollo, las capacidades y la existencia de fuentes semilleras certificadas (o comprobadas genéticamente) y de un sistema de certificación, que garanticen el suministro oportuno, permanente, calidad física y genética de las semillas forestales en las especies compatibles con mercados nicho objetivo, ha sido considerado uno de los factores críticos para mejorar la competitividad de la cadena forestal.
- c) El análisis de tendencias en Mejoramiento Genético Forestal a nivel mundial, tiene como objetivo principal obtener información de fuentes académicas y científicas válidas y reconocidas respecto al tema de investigación y producción de semillas forestales maderables o propagación clonal, específicamente en su calidad genética.
- d) Las fuentes semilleras constituyen el retorno de la inversión en la mayoría de los programas de mejoramiento genético. Se consideran y deben visualizarse como parte de un programa integral de mejoramiento genético local, regional y/o nacional, en constante progreso y con ganancias genéticas que respondan a las diversas calidades que demanda el mercado y los consumidores actuales y potenciales de los productos de la madera.
- e) Las fuentes semilleras junto con los procesos de mejoramiento de los sistemas de propagación comercial de plantas, permitirán consolidar y poner a disposición de los reforestadores, los productos de las investigaciones, avances del mejoramiento genético forestal, además de la confianza y seguridad de las empresas semilleras.
- f) La calidad genética de la semilla sexual o clonal para siembra, es uno de los requisitos actuales y futuros irremplazables a tener en cuenta como punto de partida, para lograr plantaciones (convencionales o clonales) de manejo intensivo, reducción del turno de aprovechamiento, reducir costos de establecimiento, cosecha y/o procesos industriales, alto rendimiento, mayor calidad productividad, competitividad y sostenibilidad en todo el mundo.
- g) Existe una tendencia hacia el aumento del área actual plantada y a depender del consumo de materia prima procedente de plantaciones forestales, originadas de semillas de especies nativas o exóticas, mejoradas y de huertos semilleros certificados genéticamente, para el cultivo de árboles y su posterior aprovechamiento industria

forestal. Ello garantiza el alto valor de los productos y subproductos forestales en la industria y el mercado de las maderas actual y futuro.

- h) Un requisito esencial de todo programa de plantación es asegurar una fuente oportuna y permanente de suministro de semillas de calidad, independientemente de que éstas se obtengan a nivel local o se adquieran en otra parte. Su calidad determinará no sólo el número de plántulas sanas obtenidas en viveros, sino también su posterior supervivencia, crecimiento, ganancia en cantidad y calidad de los productos deseados, rentabilidad y éxito industrial de las plantaciones.
- i) Las fuentes semilleras de alto valor y calidad genética, como los huertos semilleros, sustituyen la necesidad de importar semilla, que además de cara, puede que no sea genéticamente mejorada y conllevan la posibilidad de introducir plagas, malezas o enfermedades exóticas.
- j) Las fuentes semilleras suministran semilla de calidad en forma rápida, oportuna, permanente, de fácil acceso, origen conocido, en poco espacio y a bajos costos, tanto en corto como en largo plazo.
- k) Aunque la ganancia genética obtenida con el uso de semilla de fuentes semilleras, depende de varios factores, entre los que se destacan la adaptabilidad de la especie, grado de mejoramiento genético, selección y heredabilidad del carácter de interés, se han reportado ganancias del 6% al 25% para varios caracteres de importancia forestal debido al empleo de semilla de fuentes confiables (Ipinza, 1998).

### 9.3. Tipos de fuentes semilleras para plantación.

Según Cornelius y Ugarte-Guerra (2010) y Murillo (1990), en el inicio de un programa de mejoramiento genético forestal normalmente se opta por varios sistemas que permiten obtener material para plantación en el corto, mediano y largo plazo. Como corto plazo se incluyen todas aquellas fuentes semilleras que permitan obtener semilla temporalmente durante los siguientes tres años. Se asume, que en la medida que la(s) especie(s) a plantar aumenten su importancia comercial, se deberá entonces desarrollar fuentes semilleras de mucho valor o calidad genética, a través de programas de mejoramiento genético (Murillo, 1990).

a) En el **corto plazo** se utilizan **Árboles Semilleros (AS)**. Este sistema consiste en seleccionar individuos fenotípicamente superiores en una plantación, con el fin de coleccionar su semilla para siembra a escala comercial. Normalmente se seleccionan entre 20 a 50 árboles/ha, considerando en ellos aspectos de volumen, rectitud, forma de la copa, calidad de ramas (ángulo y diámetro) y sanidad. La cosecha de la semilla se realiza junto con la cosecha del bosque, previa marcación de los árboles, sin embargo y para un control más efectivo del material coleccionado, es preferible escalar los árboles seleccionados para estos fines.

La semilla de **AS** por lo tanto es originada de un árbol madre seleccionado, pero el polen proviene de cualquier árbol del rodal. Las ganancias estimadas para estos casos normalmente son de 3-5% en volumen.

b) Otra fuente semillera de **corto** plazo son las **Áreas Productoras de Semillas (APS) o rodal semillero**, en cuyo caso la selección se hace tanto para la madre como para el padre. El sistema consiste en raleo intensivamente un rodal de buena calidad dejando entre 100 a 300 árboles/ha para que se crucen libremente. Dependiendo del sistema reproductivo de la especie, se podrá obtener semilla con algún grado de mejoramiento en menos de un año (en coníferas tardará 2 años). Es importante entonces, efectuar los raleos antes del inicio de la floración.

Es importante que los rodales que se utilizan para las **APS** sean los mejores y de preferencia aislados de otros rodales de la misma especie. Si ello no es posible, se debe dejar una zona perimetral de aislamiento de 80 a 100 m con una densidad de 400 a 600 árboles/ha, cuya semilla no se debe cosechar.

Los rodales semilleros se pueden originar a partir de bosque natural (muy común en el género *Pinus* spp), plantaciones o unidades experimentales de ensayos de campos forestales. Las **APS**

tienen una ganancia estimada de 5-8% en volumen. El valor dependerá de la calidad del rodal elegido, la intensidad del raleo y el periodo de espera entre el raleo y la cosecha.

El manejo al que es sometido un rodal semillero, busca mejorar la calidad genética y aumentar la producción de semillas en el menor tiempo posible, así como reducir los costos de recolección. Para las especies de prioridad alta, los rodales semilleros ofrecen una alternativa rápida pero temporal para el abastecimiento de semillas, mientras se desarrolla un programa que garantice la producción de material de calidad genética superior, a mediano o largo plazo. Así mismo, para especies de menor importancia, las cuales no justifican un programa complejo de mejoramiento, el rodal semillero ofrece la posibilidad de efectuar un mayor control sobre la semilla que se usa en la reforestación, evitando así el uso de semilla de calidad inaceptable procedente de recolecciones sin control, al mismo tiempo que se asegura la disponibilidad de semilla ligeramente mejorada.

**c) Jardines clonales de árboles plus.** Esta es una nueva opción que se ha venido desarrollando en los últimos 10 años en la región. Consiste en el establecimiento de bancos clonales, denominados jardines clonales, donde se han reproducido cuidadosamente cada uno de los árboles plus seleccionados en campo. Hoy día se localizan en condiciones controladas dentro de invernaderos con el fin de facilitar su multiplicación masiva a bajo costo y en cualquier época del año. Las técnicas de propagación vegetativa de esta modalidad siguen evolucionando, al punto que hoy día se habla de minijardines clonales que permiten ya la producción a gran escala de mini estaquillas clonadas.

Como principal ventaja tiene que se logra reproducir masivamente cada árbol plus en un plazo de 1 año o menos, es decir, se captura el 100% de su información genética y se puede llevar a campo comercialmente. Esto permite lograr una ganancia genética muy alta en muy corto tiempo.

El riesgo que presenta esta modalidad de semilla, es que mientras no haya sido comprobada su adaptabilidad y superioridad genética en ensayos de campo, algunos genotipos podrían no desempeñarse bien en terreno. Este riesgo podría aumentar si se traslada de forma indiscriminada el material clonal, a regiones con condiciones ambientales muy diferentes a las de donde fueron seleccionados los árboles plus originales. Para reducir este potencial riesgo, inicialmente se planta solamente mezclas de no menos de 15 clones o árboles plus.

Otra desventaja que presenta esta fuente semillera, es que no todas las especies leñosas son fáciles de propagar vegetativamente, en particular árboles plus que han sido seleccionados en edad madura.

**d)** Para el mediano y largo plazo el sistema utilizado son los **Huertos Semilleros**, que se constituyen a partir de la selección de **Árboles Plus (AP)**. Es una plantación de árboles (clones o progenies) seleccionados, con pedigrí conocido, con arreglo espacial, aislada y manejada para eliminar o reducir la polinización de fuentes externas y para producir cosechas de semillas frecuentes, abundantes y fácilmente colectables. Cada árbol ha sido seleccionado por la comprobada calidad genética de la semilla que produce.

Los huertos semilleros se pueden originar de ensayos genéticamente raleados (**Huertos Semilleros Comprobados Genéticamente**). Por lo tanto, el Huerto Semillero es un área donde se reúnen individuos fenotípica y genéticamente superiores, para permitir el libre cruzamiento entre ellos y producir semilla de alta calidad genética.

La intensidad de selección para formar los Huertos Semilleros es bastante más alta respecto a los métodos anteriores. Para Pino radiata en Chile se utilizó 1 cada 80.000 a 100.000 árboles (uno cada 80 a 100 ha), sin embargo dependiendo de la estrategia del programa se han usado en otras especies 1 cada 5 ha o uno cada 10 ha. Normalmente los Huertos Semilleros derivan de la



selección de 40 a 60 Árboles Plus. El producto de cualquier huerto semillero puede ser semilla sexual o asexual. Los huertos sustituyen la necesidad de importar semilla, que además de cara, puede que no sea genéticamente mejorada o que no se adapte bien a las condiciones ambientales locales.

La calidad de la selección de los AP condiciona la calidad de los Huertos y la base genética de los programas sobre la cual se realizan todas las inversiones futuras. Para asegurar dicha calidad y aumentar la eficiencia de la selección, deben considerarse las siguientes medidas:

- i. Elegir los mejores rodales para realizar la selección (constitución genética más adaptada).
- ii. Que los rodales sean lo más uniformes posibles en cuanto edad, espaciamiento, micro sitios, etc. Al uniformizar las condiciones existe mayor probabilidad de que el árbol más destacado lo sea por constitución genética y no por ventajas ambientales. Por estas razones normalmente las selecciones en plantaciones son más eficientes que en bosques nativos (Vallejos *et al.* 2010).
- iii. Utilizar árboles de comparación para eliminar variaciones ambientales. Normalmente el método consiste en comparar el candidato con los mejores 4 ó 5 árboles vecinos que se encuentran dentro de un radio de 20 m.
- iv. Restringir la selección de los árboles plus en pocos caracteres al inicio de un programa de mejoramiento genético, ya que existe una correlación negativa entre el número de caracteres y la eficiencia de la selección.
- v. Es importante comprender la diferencia entre rodales semilleros y huertos semilleros, ya que la intensidad de selección para establecer un rodal semillero (aproximadamente 1 en 10) es mucho menor que en comparación con la de un huerto semillero (con una intensidad de selección mayores que 1 en 1000 hasta 50 000), donde existen una mayor probabilidad de que se hayan seleccionado solo los mejores árboles. Comparativamente, por lo tanto, la calidad genética del rodal semillero es mucho menor (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; Murillo, 1990 y Zobel y Talbert, 1988).

#### 9.4. Tipos de Huertos Semilleros.

Dependiendo del sistema de propagación, existen principalmente dos tipos de huertos semilleros:

##### a) Huerto Semillero de Semilla (HSS) y b) Huerto Semillero Clonal (HSC).

a) Los **HSS** provienen de plántulas de semillas sexuales que se colectan de cada uno de los árboles plus (AP) que fueron seleccionados. También se le conoce como huerto semillero de plántulas (HSP). Se originan a partir de ensayos de progenie, con arreglo espacial, utilizando un diseño experimental en hileras, parejas distribuidas aleatoriamente dentro del ensayo de árboles individuales (*Single Tree Plot* en inglés), Por lo tanto, son familias de medios hermanos donde la madre es el AP seleccionado y el padre cualquier otro árbol vecino del mismo rodal donde se localizó y seleccionó a la madre. Para convertir un ensayo de progenie en **huerto semillero comprobado genéticamente**, se utilizan los resultados de evaluación de campo del ensayo de progenies, donde se establece el ranking de las mejores familias y los mejores individuos dentro de familias, con base en su valor genético. Con esta información se procede a realizar los raleos genéticos o ranking, con el objetivo de mejorar la calidad genética de la semilla. Dos tendencias se conocen al respecto: a) se elimina por completo el 50% de las familias que se ubican por debajo del promedio en el ranking genético global, incluyendo el 50% de los peores individuos de las mejores familias, b) se elimina progresivamente 1 ó 2 individuos de las mejores familias, conforme se descende en el ranking se eliminan más individuos por familia, hasta dejar 1 ó 2 individuos de las peores familias. Es decir, hasta la familia peor ubicada en el ranking tendrá un individuo en la población de mejoramiento. Ambas estrategias se utilizan en los programas de mejoramiento genético internacional. La segunda estrategia ha cobrado más adeptos debido a que no reduce tan drásticamente la diversidad genética de la población de mejoramiento. Antes de que se efectúen los raleos genéticos, se le denomina como **huerto semillero no comprobado genéticamente**.

En estos la autofecundación sólo puede ocurrir en el árbol individual, a diferencia de lo que ocurre en los HSC, en donde la autofecundación puede ocurrir por la fecundación de polen entre rametos

de un mismo clon. Debe tenerse mucho cuidado con la distribución espacial de los materiales dentro del Huerto Semillero, ya que si se han sembrado en líneas de 5 ó 6 individuos por familia, existirá el riesgo de que se polinicen entre sí. Los diseños que ubican por separado a los individuos de cada familia, son más seguros en este aspecto y permiten que estos ensayos de progenie puedan fácilmente convertirse en huerto semillero de producción.

La ventaja aparente del HSS es que la evaluación de las descendencias (progenies) y la producción de semilla se pueden llevar a cabo en el mismo sitio. Sin embargo, los ensayos de progenies se establecen normalmente en sitios típicos de reforestación, los cuales no siempre son adecuados para la producción de semilla. Los HSS usualmente son fuentes alternativas de semilla mientras se desarrollan los HSC.

Se acepta que sólo en circunstancias especiales los HSS podrían ser preferibles a los HSC, por ejemplo:

- i. Cuando existen problemas severos con la posibilidad de obtener vegetativamente a los rametos de cada clon: incompatibilidad en injertos o deformación de las raíces en estacas.
- ii. Cuando incluye un gran número de fenotipos (árboles seleccionados) por ejemplo más de 100.
- iii. En especies con floración temprana, como en teca, melina, los eucaliptos, acacias y pinos tropicales.

**b) Huerto Semillero Clonal (HSC).** Se establecen a partir de rametos o propágulos vegetativos (semilla asexual), es decir material vegetativo, tales como injertos, estacas, acodos aéreos, miniestaquillas, plántulas obtenidas por cultivo de tejidos o en un jardín de multiplicación clonal; Se busca que sean establecidos en áreas con buen aislamiento, bajo condiciones favorables para la floración y para la fertilización de las flores y manejadas para la máxima producción de semilla. El HSC, logra conservar el 100% de los genotipos seleccionados (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010).

En el momento en que realiza la colecta de la semilla de los árboles “plus”, con los que se espera sean establecidos los ensayos de descendencias o progenies, se procede también a recolectar material vegetativo maduro de la copa de los AP, con los que se trabaja luego en el establecimiento de injertos. Este material injertado se constituye entonces en los clones que se plantan en el huerto semillero. Posteriormente se eliminarán los clones inferiores con base de los resultados de los ensayos genéticos (al igual que se hace con las familias inferiores en el caso del HSS). Esta modalidad de huerto semillero clonal, **requiere** que el material vegetativo sea adulto, así los clones en el huerto florecen y producen semilla más rápidamente y desarrollan una copa baja y fácilmente accesible. Es conveniente utilizar los huertos semilleros injertados para las especies de desarrollo más lento, para no tener que esperar tantos años en iniciar con la producción de semilla mejorada.

En especies de inicio de floración temprana, como Acacia mangium, teca y melina, los huertos semilleros clonales pueden ser establecidos a partir de ensayos clonales regulares con miniestaquillas, y no necesariamente a través de injertos.

Generalmente en su establecimiento se utiliza un diseño de parcela simple por AP para su establecimiento, cuidando de que en bloques vecinos no queden muy cerca de rametos pertenecientes al mismo clon, para disminuir la probabilidad de autocruzamientos (endogamia). El HSC es el más utilizado operativamente, no obstante, el riesgo de autofecundación es mayor cuando los rametos de un mismo clon no están bien separados o cuando se utilizan pocos clones, por ejemplo menos de 10.

Una de las ventajas de los huertos clonales es que busca maximizar la producción de semilla dando énfasis al desarrollo de las copas, lo que se logra mediante un espaciamiento amplio. El establecimiento de un huerto semillero clonal debe estar precedido, o al menos, seguido lo antes

posible, por el establecimiento de pruebas genética de comprobación. Una desventaja importante es el laborioso trabajo que involucra la recolección de yemas y la injertación, el mantenimiento de rametos saludables antes de plantarlos y problemas de incompatibilidad entre el patrón y el injerto.

Los HSC deben localizarse en sitios con las mejores condiciones ambientales para la floración y fructificación de la especie. La calidad de la semilla dependerá básicamente de la rigurosidad con que se seleccionaron los AP. La experiencia ha demostrado que la ganancia de un Huerto Semillero de Clones (**HSC**) será de entre 20 a 25% en volumen de madera (Murillo, 1992b), valores que podrán aumentar al utilizar solamente la semilla de los mejores clones del Huerto y con las depuraciones que progresivamente se realizan con la información proveniente de los ensayos genéticos.

Los HSC tienen dos ventajas principales: **i)** los sitios para el huerto no están restringidos a las áreas apropiadas para ensayos y **ii)** pueden establecerse en áreas que faciliten el manejo y favorezcan la producción rápida de grandes cantidades de semilla. En los HSC es posible una intensidad de selección mucho mayor, puesto que es posible plantar un pequeño número de selecciones, por ejemplo los mejores 30 genotipos del programa. Mientras que en los HSS es necesario dejar mas árboles por hectárea para lograr una polinización adecuada. Las selecciones para un HSC pueden provenir de varios sitios de prueba, mientras que los HSS usualmente se crean a partir de solo uno o dos sitios (para una generación de cruzamiento dada (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; Zobel y Talbert, 1988).

En la Tabla 9.1, se presenta un análisis comparativo general de la producción de semilla versus clon en especies forestales (Murillo *et al.*, 2001).

**Tabla 9.1.** Análisis comparativo entre un mercado de semillas y plantas clonadas para reforestación.

Criterio	Semilla	Clon
Ganancia genética esperada	$G = \frac{1}{2} i * S * h^2$	$G = i * S * H^2$
Homogenización de la plantación	Muy baja	Muy alta
Dependencia de la fenología y del clima	100%	0 %
Posibilidad de propagar árboles macho (especies dioicas como el <i>Hieronyma alchorneoides</i> )	Ninguna	100%
Posibilidades de almacenamiento	Muchas especies son recalcitrantes y no se pueden almacenar	No se necesita
Tiempo de propagación en vivero	De 1,5 a 6 meses	De 4 a 16 semanas
Costos de producción de una planta	US \$ 0,09 a 0,18	US \$ 0,15 a 0,25
Requerimientos de tecnología y capacitación	Bajo	De mediano a alto (ambientes protegidos)
Requerimientos de capital, inversión	Bajo	De bajo a mediano (ambientes protegidos)
Facilidad de comercialización	Alta	Mediana, requiere de tecnología de embalaje
Valor comercial por unidad	Bajo	Mediano a bajo

### 9.5. Categorías de fuentes semilleras.

Debe tenerse presente que la estrategia de producir semilla sexual o clonal de árboles, debe visualizarse como parte del avance de un programa de mejoramiento genético. De lo contrario, se estaría propagando cualquier tipo de individuo, sin ningún rigor de selección fenotípica, que ocasionarían el desarrollo de plantaciones de baja calidad genética. **La propagación vegetativa no es garantía de la calidad del árbol.** Debido a la gama de opciones que se pueden tener hoy día, en Costa Rica se ha desarrollado desde 1992, un Reglamento Técnico de Producción y Comercialización de Semillas y Plántulas de Viveros Forestales, adscrito a la Oficina Nacional de Semilla (ONS, 1992). Este Reglamento fue debidamente actualizado en el 2008 y se resume a continuación las principales categorías de fuentes semilleras existentes:

**Certificada A:** Semilla proveniente de huertos semilleros o jardines clonales depurados genéticamente, compuestos exclusivamente por material élite, genéticamente comprobado en el país, aislados de polen inferior y aprobados por la ONS.

**Certificada B:** Semilla proveniente de huertos semilleros o jardines clonales derivados de árboles plus, sin comprobación genética en el país o con aislamiento insuficiente.

En Colombia, oficialmente se consideran dos sistemas de producción de semilla forestal: **i) Semilla sexual y ii) Semilla asexual.** La semilla sexual, hace relación al material de propagación que se podrá comercializar en dos estados: **semilla no germinada y semilla germinada**, mientras que la semilla asexual es todo aquel material de propagación que se podrá comercializar en forma de esquejes, estacas enraizadas, injertos, plántulas, etc. De acuerdo a su calidad, las semillas se han clasificados en cuatro categorías, a saber (ICA, 2010):

- a) **Semilla Tipo A:** Es la semilla forestal obtenida de un huerto semillero genéticamente comprobado establecido en el país. Para que la semilla forestal importada obtenida de un huerto semillero genéticamente comprobado se clasifique como semilla tipo A, deberá estar certificada por la autoridad competente del país de origen.
- b) **Semilla Tipo B:** Es la semilla forestal obtenida de un huerto semillero NO comprobado establecido en el país. En este tipo, también se considera la semilla forestal importada procedente de cualquier huerto semillero NO certificado en el país de origen.
- c) **Semilla Tipo C:** Es la semilla forestal obtenida de un rodal semillero establecido en el país, así como la semilla forestal importada procedente de cualquier rodal semillero certificado en el país de origen.
- d) **Semilla Tipo B:** Es la semilla forestal obtenida de una fuente seleccionada establecida en el país, así como la semilla forestal importada que no tiene certificación en el país de origen.

A nivel de producción de plántulas en vivero, se establecen y reglamentan dos sistemas de producción: **i) plántulas en sustrato y ii) plántulas a raíz desnuda.** Las plántulas para su comercialización, se clasifican en:

- a) **Plántula Tipo A:** La obtenida con semilla forestal tipo A.
- b) **Plántula Tipo B:** La obtenida con semilla forestal tipo B.
- c) **Plántula Tipo C:** La obtenida con semilla forestal tipo C.
- d) **Plántula Tipo D:** La obtenida con semilla forestal tipo D.

## 9.6. Consideraciones técnicas para el establecimiento de rodales o huertos semilleros.

Diversos autores (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; ICA, 2010; Rodríguez y Nieto, 1999; Ipinza, 1998; Murillo, 1992a; Murillo, 1990; Hartl y Clark, 1989; Zobel y Talbert, 1988) mencionan las consideraciones técnicas a tener en cuenta en el establecimiento de rodales o huertos semilleros. Por considerar este aparte de gran interés para que las fuentes semilleras cumplan su objetivo, a continuación se presenta un resumen de los factores y recomendaciones más importantes

**a) Necesidad.** Cualquier huerto semillero debe establecerse cuando se ha priorizado clara y objetivamente la mejor especie o procedencia de interés de acuerdo a las necesidades, requisitos, condiciones y demandas del mercado. Lo anterior, en razón a que existen muchos ejemplos en América de huertos que no se utilizan porque los ensayos posteriores mostraron que otra especie, genotipo o procedencia de la misma especie era mucho más productiva que el material del huerto. En general, las ganancias a partir de la elección adecuada de la especie o la procedencia, serán mayores que las producidas por una generación de mejoramiento genético dentro de una especie o procedencia no priorizada.

Una vez que las mejores especies y procedencias han sido identificadas a lo largo de de una evaluación rigurosa en crecimiento y adaptación, entonces se puede iniciar la selección de individuos sobresalientes para conformar los huertos semilleros. La existencia de suficiente superficie plantada o ensayos de introducción de material, permitirán una alta intensidad de selección y una buena posibilidad de lograr un alto impacto con un programa de mejoramiento genético.

**b) Localización.** Esta es una de las decisiones más importante es la ubicación del huerto semillero. Una ubicación apropiada significa la diferencia entre una producción nula o abundante. También puede significar la diferencia entre producción temprana y tardía. Los costos de producción de semilla varían tremendamente de acuerdo con la ubicación del huerto. Se debe asegurar, sin lugar a dudas, que la especie está adaptada a la zona, en condiciones ambientales donde pueda crecer, florecer y producir semilla viable y en forma abundante.

Es aconsejable utilizar suelos con poca o **ninguna pendiente**, pero si esto no es posible, se recomienda trabajar en curvas de nivel o en casos extremos se deberán hacer terrazas que reduzcan o impidan la erosión del suelo. Si un suelo no tiene buen drenaje, no se debe instalar el huerto semillero.

Los huertos semilleros son manejados intensivamente para producir semilla en forma frecuente y abundante, y **deben estar aislados** para reducir la polinización de fuentes externas de calidad inferior, ya que de lo contrario se compromete la ganancia genética obtenida. Aún cuando a veces sea difícil lograr un aislamiento total, que evite la contaminación por polen no deseado. Para lograrlo se debería ubicar el huerto fuera del área forestal o en lugares alejados de donde existan plantaciones de su misma especie., Es preferible siempre prevenir y dejar una barrera de aislamiento de por lo menos 200 metros entre el huerto y los rodales más cercanos de la misma especie u otras especies con las cuales el huerto se podría hibridizar, de manera que se logre evitar que el huerto no sufra contaminación de polen externo indeseado o de menor calidad genética.

La distancia mínima de aislamiento varía para cada especie dependiendo de su sistema de polinización natural y existencia de barreras naturales como cerros, ríos, lagos, etc. Por lo general se recomienda una separación mínima de 1 km a la redonda. En general, dentro de una misma zona, es posible aislar en forma más eficiente los huertos de mayor área y de forma cuadrada; por eso un solo sitio grande es preferible que varios pequeños. En algunos casos en donde no se pueda aislar adecuadamente, es posible definir un “área efectiva de producción” y un “área de barrera para aislamiento o faja de protección”. En la barrera de aislamiento o faja de protección no se debe coleccionar semilla.

Es muy importante además, **asegurar el acceso vehicular fácil** a los huertos para facilitar la ejecución de todas las labores necesarias, desde el establecimiento hasta la recolección de las semillas. Si el acceso es fácil, las visitas de inspección podrán ser más frecuentes y los resultados en términos de producción serán mejores. Si el área del rodal lo amerita económicamente es aconsejable **mejorar las vías de acceso**, para garantizar accesibilidad todo el año. Es

conveniente **establecer huertos en terreno plano**, lo cual reduce los costos de mantenimiento y recolección y permite la mecanización de algunos trabajos.

En la ubicación de un huerto semillero se debe tener en cuenta los **factores de clima y suelo**. En cuanto al clima, no es conveniente elegir sitios expuestos a temperaturas extremas; esto dependerá de la especie que se va a sembrar. Por ejemplo: El aliso necesita lugares húmedos, con un periodo seco no muy prolongado y no muy alto. Con relación a suelos, estará determinado por la especie, ya que cada una tiene requerimientos diferentes; pero conviene señalar que es preferible suelos sueltos, no muy arenosos o arcillosos, con buen drenaje y profundidad. Las áreas con vientos lo suficientemente fuertes para deformar los árboles también deberían ser evitadas. De ser necesario, se deberá establecer barreras cortavientos para evitar pérdidas por caída de flores y daño de copas.

Las áreas potenciales para el huerto deberían evaluarse para determinar peligros potenciales. En Costa Rica, el mejor huerto semillero clonal de melina se ha debido remover de su lugar por estar localizado en una zona que estará pronto inundada con un proyecto hidroeléctrico. Muchos huertos se han perdido en varios países por tornados, huracanes, incendios y situaciones climáticas inusualmente severas como heladas o sequías. Cuando exista un peligro significativo, puede ser aconsejable establecer otro huerto de respaldo en caso de que el primero se pierda. Una inversión tan importante no debería dejarse a los designios de la naturaleza.

No es necesario establecer los huertos en, o cerca de los sitios donde se llevará a cabo la plantación. En algunos casos, puede ser necesario ubicar los huertos incluso fuera del país donde se utilizará la semilla, a fin de lograr la producción de suficiente semilla a bajo costo. En muchos casos será necesario adquirir nuevas tierras apropiadas para el establecimiento de los huertos.

**c) Base genética.** La recomendación técnica indica que, una vez eliminados los individuos de menor valor genético (raleo genético), deben quedar en pie **mínimo de 20 familias ó clones** (Murillo, 1992b). Esto significa que se reducirá la cantidad inicial de familias o clones, por lo tanto es recomendable iniciar el huerto semillero con un **número mayor que puede ser de 40 a 60 familias**, considerando un mínimo de **30 árboles por familia** (Resende, 2007).

El uso de semilla con poca diversidad genética puede causar **problemas debido a la depresión endogámica**. Para evitar problemas, las colecciones de semilla se deben hacer de por lo menos 20 árboles individuales. Los árboles semilleros de rodales naturales, deben estar separados entre sí por una distancia de **por lo menos 200 m** (para reducir la probabilidad de incluir parientes cercanos en la colección).

En el caso de rodales semilleros para **especies dioicas**, es importante tratar de mantener el **mismo número de árboles masculinos y femeninos**. Si se deja por ejemplo, 20 árboles semilleros y 2 árboles masculinos, se introduce un **cuello de botella genético** cuya amplitud es fijada por los dos árboles masculinos. (Hartl y Clark, 1989).

Debe tenerse presente que en un programa de mejoramiento genético debidamente constituido, con suficiente base genética para sustentar varias generaciones de mejoramiento (visión de largo plazo), los huertos semilleros constituyen lo que se denomina como la población élite o de uso comercial. Esto implica que el programa deberá contar con un número de materiales unas 8 a 10 veces mayor, donde existirá una colección más amplia, que se le conoce como población de mejoramiento. Únicamente los mejores 15 a 20 individuos son entonces los que se utilizan para el establecimiento de las unidades de producción de semilla en cada generación de mejoramiento (Murillo y Badilla, 2005).

**d) Tamaño del huerto semillero.** El tamaño del huerto se debe definir de acuerdo a un **diagnóstico preliminar** de la situación de cada especie de interés para conocer las existencias, necesidades actuales y futuras de semilla a nivel nacional y regional; programas actuales y futuros de reforestación y posibilidades de exportación. Es

prudente **sobreestimar por lo menos en un 30% las necesidades actuales de semilla** (Zobel y Talbert, 1988), dado que las áreas a reforestar aumentan, los viveros generalmente no aprovechan bien la semilla que se supe y la producción de semilla varía de año en año. Es necesario, además, contar con una reserva para los años de baja producción. En algunos casos, la venta de semilla puede ser un negocio lucrativo que puede ayudar a recuperar algo de los costos del establecimiento y mantenimiento del huerto.

Un huerto manejado intensivamente producirá considerablemente más semilla por hectárea que uno sin manejo intensivo. Por lo tanto, al determinar el tamaño del huerto, se debe decidir el tipo de manejo que se adoptará. Solo la protección contra insectos dañinos puede duplicar la producción de semilla.

Para muchas especies existen estimados de producción de semilla (en kilos) por árbol o por hectárea. Estos pueden utilizarse como un punto de partida si no existen datos locales. Una vez que se tienen los estimados de producción, las necesidades de semilla pueden calcularse a partir de la siguiente información: **i)** Hectáreas que serán plantadas cada año (promedio y máxima anual), **ii)** Densidad de plantación, **iii)** Número de semillas por kilo, **iv)** Eficiencia del vivero en términos de número de plántulas útiles producidas por kilo de semilla y **v)** Factor de imprevistos, en caso de que haya habido imprecisión en las estimaciones. La mayoría de las organizaciones aumentarán el tamaño del huerto en un 20 a un 50% para un estimado conservador del número de hectáreas necesarias. En el caso de inseguridad acerca de adquisiciones de terreno en el futuro, puede ser deseable plantar el doble de las hectáreas calculadas.

A continuación se muestra un ejemplo real de diseño de un huerto semillero para producir semilla de melina en la zona norte de Costa Rica (Murillo, 1990):

$$\begin{aligned} \text{Demanda de semilla a producir anualmente} &= \frac{AxBxC}{DxE} \\ &= \frac{(1500\text{ha})x\left(\frac{1111\text{plantas}}{\text{ha}}\right)x(1,15)}{(0,6)x(0,9)} \\ &= 3\,550\,000 \text{ semillas} = 3\,550 \text{ kg} \end{aligned}$$

donde:

A = tasa de reforestación anual (ha) esperada

B = número de árboles/ha

C = 1+% de reposición en plantación por mortalidad (15%)

D = 1-% de plántulas pérdidas y desechadas en la fase de almácigo (40%)

E = 1 -% de eficiencia en el manejo del huerto semillero. Se estima en un 90%.

El Huerto estará compuesto por un número determinado de Bloques, que es su unidad básica y contiene la colección completa de clones o familias. El número de bloques se repetirá tantas veces sea necesario hasta completar la demanda de semilla.

Finalmente:

$$\text{Tamaño del Huerto semillero} = \frac{Ax D}{Fx\left(10000\frac{m^2}{ha}\right)x(G)}$$

A= demanda anual de semilla en kg

B= número de clones en el huerto (36 clones para este ejemplo)

C= área que ocupará un clon en m<sup>2</sup> (6 x 6m = 36 m<sup>2</sup>/rameto)

D= área por bloque (BxC) en m<sup>2</sup>/bloque del Huerto semillero

(Área del Bloque = 36m<sup>2</sup>/árbol x 36 clones = 1300 m<sup>2</sup>/Bloque)

E= producción de semilla por rameto por año en kg = 0,8 kg/árbol de melina/año

F= producción de semilla por bloque por año (BxE) en kg/bloque

(36 clonesx0,8k/rameto/año = 28,8kg/bloque/año)

G= factor de compensación por la eliminación de clones en los raleos genéticos

Para este ejemplo se tiene entonces:

$$G = 1 - \frac{\text{No. de clones a eliminar}}{\text{No. total de clones}}$$

$$G = 1 - \frac{16}{36}$$

$$G = 0,556$$

con lo que el tamaño del huerto semillero sería igual a:

$$\frac{(3550 \text{ kg de semilla}) (1300 \text{ m}^2/\text{bloque})}{(28,8 \text{ kg/bloque})(10000 \text{ m}^2/\text{ha})(0,556)}$$

$$= 28,8 \text{ hectáreas para todo el Huerto Semillero}$$

**e) Distancias de siembra.** La **distancia inicial** de un huerto semillero por lo general oscila entre 5 y 10 m, dependiendo de la arquitectura de copa de la especie y del espacio disponible para producción de semilla. Los huertos de vida corta, tales como los utilizados para eucaliptos de rápido crecimiento, pueden ser plantados a un espaciamiento menor. El tiempo de permanencia y el tamaño final de los árboles determinara el espaciamiento inicial. También se utilizan espaciamientos menores en los casos donde la información sobre la descendencia de los progenitores incluidos en el huerto estará disponible poco tiempo después de su establecimiento.

En el huerto semillero, el espacio entre plantas debe ser lo suficientemente ancho para permitir el libre y completo desarrollo de la copa con bastante iluminación; para asegurar una buena cosecha. La siembra se puede hacer en cuadrados, rectángulos o en tresbolillo.

**f) Material para siembra** Los árboles superiores para el huerto pueden ser propagados vegetativamente mediante estacas enraizadas, injertos o acodos. Generalmente se establecen huertos semilleros con semilla vegetativa, no es muy común la instalación con semilla sexual, y cuando se realiza, suele hacerse para investigaciones (ensayos de progenies, procedencias, etc).

El enraizamiento de estacas puede utilizarse para especies que enraízan fácilmente mediante ramas o rebrotes de tocones de los árboles seleccionados. Muchas especies, tales como los eucaliptos, teca, melina, latifoliadas nativas y *Pinus oocarpa* pueden ser propagados fácilmente mediante estacas enraizadas de rebrotes. Los rebrotes producen material juvenil que enraíza más fácilmente que las ramas de un árbol adulto. Si ya existen facilidades para el enraizamiento, esta técnica es usualmente más fácil que el injerto o el acodo. Sin embargo, el uso de rebrotes de tocones puede significar el corte del árbol superior y se corre el riesgo de que el árbol no rebrote o que el material no enraíce, lo cual resulta en la pérdida del genotipo.

Si la brotación produce material rejuvenecido, habrá un retraso en la floración comparado con los injertos, los cuales provocan poco o ningún rejuvenecimiento. Si se obtienen sobrevivencias satisfactorias de los injertos, este método será preferible al de estacas juveniles enraizadas.

La forma más común de propagación para huertos semilleros es el injerto. Con experiencia y cuidado, la mayoría de las especies pueden ser propagadas exitosamente por injertos, con la ventaja de que se preserva mayormente la madurez del material. Lo cual resulta en la forma más rápida de obtener producción de semilla por propagación vegetativa.



La mejor técnica y tipo de injerto varían con la especie. Los tipos más comunes son el de yema lateral y el de púa. Para algunas especies, es mejor el injerto de yema lateral, mientras en otras especies el de púa es más exitoso. Los injertos pueden hacerse sobre patrones en potes o en el campo. El primer caso es más conveniente, ya que los injertos pueden colocarse en un ambiente que favorezca la máxima sobrevivencia (por ejemplo, un invernadero). Si los injertos se mantienen en un ambiente con una humedad relativa de 80% o mayor, no son necesarias las bolsas protectoras. Por otro lado, injertos en el campo son más rápidos de establecer que los injertos en potes (los cuales experimentan el estrés del trasplante) y pueden producir semilla hasta un año antes que los injertos en potes.

Cuando se utilizan injertos en potes, se debe tener cuidado de podar las raíces circulares que comúnmente se forman en los potes. Si estas raíces no se podan, continuarán creciendo de esa manera y eventualmente matarán al árbol.

Por considerarlo de gran interés, a continuación se relacionan algunas consideraciones que se deben tener en cuenta, para que el proceso de injertación sea exitoso (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; Ipinza, 1998; Zobel y Talbert, 1988):

- i. **Quién la hace y el cuidado que se ponga al hacerlo.** Los resultados de injertadores individuales, utilizando el mismo material, varían grandemente. El injertador debe hacer cada injerto con absoluto cuidado y atención a los detalles para tener un alto grado de prendimiento.
- ii. **Edad de la yema.** Entre más vieja la yema, más difícil de injertar. La dificultad es mucho mayor con yemas de árboles de más de 5 años de edad.
- iii. **Edad y condición del patrón.** Los patrones jóvenes, bien establecidos y fertilizados son los mejores, y habrá poca dificultad con patrones de un año de establecidos en el campo (plantas de dos años). Los patrones débiles y enfermos no deberán injertarse; sería una pérdida de tiempo y dinero. Las plantas infectadas deben destruirse.
- iv. **Clima.** El clima fresco con alta humedad es el mejor. Los vientos fuertes con humedades bajas son un peligro y podrían causar la mortalidad total.
- v. **Especie.** Hay grandes diferencias entre especies con respecto al éxito del injerto.
- vi. **Cuidados posteriores.** Hay un punto clave en el éxito de la injertación. La remoción demasiado pronta de la bolsa de protección es fatal, al igual que la remoción demasiado pronta o demasiado tarde de la cinta. El trato brusco de los injertos recientes a menudo rompe las uniones débiles o pobres. No se puede construir una fórmula para el momento exacto de cada operación pero cada injerto debe liberarse de acuerdo a su desarrollo. La detección del momento apropiado requiere verdadera habilidad; una buena gula para iniciar la liberación es cuando las agujas nuevas tienen alrededor de 2,5 a 5 cm. de longitud.
- vii. **Materiales para la injertación.** Los suministros necesarios para la injertación pueden adquirirse de viveros o casas de suministros forestales. Los materiales necesarios para realizar los injertos, son: **1).** Cuchilla de injertar, **2).** Cintas de injertar, **3).** Piedra de afilar cuchillas y **4).** Tijeras de podar.

**g) Diseño del huerto.** La distribución más común de los clones en un huerto es al azar, tratando de que ocurra una distancia mínima de aproximadamente 30 metros entre rametos del mismo clon. Este mínimo fue determinado por estudios de distribución de polen alrededor de árboles aislados de coníferas, y se mostró que la mayoría del polen

cae dentro de esa distancia. Para muchas especies se necesitan estudios de vuelo del polen o el patrón de movimiento de sus insectos polinizadores.

Un diseño de huerto al azar es generalmente preferible para evitar patrones repetidos de proximidad de ciertos grupos clonales, como ocurren en los diseños sistemáticos. Los patrones de vecindades repetidas son indeseables porque, al movimiento del raleo genético de los clones más pobres, se pueden encontrar grupos de clones muy buenos o muy malos que producirán un espaciamiento irregular después del raleo. Cuando hay grupos de clones superiores genéticamente puede ser necesario remover algunos rametos simplemente para dejar entrar la luz. Esto ocurre con menos frecuencia en los diseños al azar. El otro argumento es la búsqueda de la máxima recombinación posible entre todos los clones, con el fin de producir semilla de alta variabilidad genética y provocar todos los posibles cruzamientos entre los árboles plus. Al estar distribuidos al azar, se garantiza que sea casi imposible que un clon determinado esté rodeado de los mismos clones.

Los diseños sistemáticos son útiles cuando no hay acceso a programas de cómputo. Es casi imposible hacer un diseño al azar manualmente sin violar la regla de la distancia mínima de 30 metros entre rametos del mismo clon. Otra ventaja del diseño sistemático es que logra un balance casi perfecto en términos de número de rametos porque al momento del establecimiento no existe información sobre las descendencias para saber cuáles clones son los mejores. Es sumamente infortunado cuando un diseño no balanceado produce el menor número de rametos de los clones con las mejores descendencias.

Se necesita un mínimo de 30 clones para el establecimiento de un huerto. Este número es necesario para permitir la distancia mínima entre rametos de un clon pero, principalmente, para proveer un número suficientemente grande de clones después de los raleos, que mantengan suficiente diversidad genética en las plantaciones comerciales derivadas del huerto. Aproximadamente un 50 a 60% de los clones deberían ser removidos de huerto como resultado del análisis de los ensayos de descendencias. El raleo genético, a la remoción de los clones inferiores del huerto, proporciona el mayor incremento en la ganancia genética del huerto.

Un árbol superior en el bosque natural o en una plantación es influenciado grandemente por el microambiente, pero el ensayo de descendencias muestra cuáles selecciones son en realidad superiores genéticamente. Un mínimo de 10-15 clones debería permanecer en el huerto después de los raleos, dependiendo de la cantidad de hectáreas reforestadas anualmente. La densidad final de un huerto debería ser aproximadamente de 40-50 árboles por hectárea.

Un gran número de clones en el huerto significa un pequeño número de rametos por clon debido la mortalidad y los raleos. La mayoría de los huertos deberían contener no más de 50 a 70 clones antes del raleo a un espaciamiento inicial de 5x10 m ó 30 a 40 clones a un espaciamiento de 10x10 m.

**h) Mantenimiento.** Los huertos semilleros son más valiosos entre mejor manejados estén. Un huerto bien manejado no solo produce más semilla, sino también es más saludable y más resistente al ataque de insectos y enfermedades.

El mantenimiento del huerto semillero deberá realizarse con excelente rigor, oportunidad y calidad para obtener semilla en forma frecuente en cantidad y de excelente calidad. El mantenimiento del huerto busca aumentar y mantener confiable la cantidad de semilla producida. Desde que se inicia la creación del rodal, es necesario elaborar un plan en el que se programen los trabajos de raleo, poda, mantenimiento y cosecha. Las siguientes son las actividades principales que deben ser planeadas y realizadas:

- i. Definir el área de recolección y la zona de aislamiento. Marcar cada una de estas en el terreno con zanjas y un pequeño poste marcado y enterrado en el suelo o una valla publicitaria. Hacer un croquis del rodal con indicaciones de cómo llegar a él.
- ii. Si es necesario deber hacerse una cerca para evitar la entrada de ganado u otro tipo de animales.
- iii. Es necesario mantener en la época seca una ronda limpia de por lo menos tres metros, para reducir las posibilidades de incendios.
- iv. Mantener permanentemente el huerto libre de malezas. Durante el primer año, se realizan deshierbas alrededor de las plantas y la maleza arrancada es colocada alrededor de la planta como mulch; la labranza debe ser superficial para no dañar las raíces. La experiencia nos aconseja que después de la siembra es conveniente dejar crecer el pasto natural, siempre que no hayan competencia marcada, entre el pasto y los árboles. Esta práctica, reduce o previene la erosión e incorpora materia orgánica al suelo.
- v. Hacer los drenajes necesarios para evitar el encharcamiento y pérdida de árboles por esta causa.
- vi. Hacer inspecciones periódicas para detectar la presencia de plagas o enfermedades, que puedan afectar la producción de semillas.
- vii. La parte más importante del manejo consiste en eliminar todos los árboles con características indeseables o enfermos. Para no producir un impacto ambiental brusco en el huerto que pueda provocar el volcamiento de los árboles o la quebradura de copas por el viento, no se deben eliminar todos los árboles indeseables de una sola vez. Es necesario programar varios raleos hasta dejar el huerto en la condición óptima. La frecuencia y la intensidad de cada intervención dependerán del estado del huerto al empezar el proceso. No es recomendable dejar menos de 50-75 árboles productores de semilla por hectárea ya que se corre el riesgo de reducir la proporción de polinización cruzada y generar efectos de endogamia en la progenie (Zobel y Talbert, 1988).
- viii. En el caso de los rodales semilleros, para decidir cuales árboles se deben eliminar, se puede utilizar el siguiente orden de prioridad: **i) Posición del árbol en el dosel:** deben ser marcados todos los árboles suprimidos y los intermedios en altura. Se dejan en pie únicamente dominantes y codominantes, pero entre estos puede haber también una selección por crecimiento diamétrico; **ii) Forma:** deben ser marcados los árboles que muestren forma de fuste indeseable; **iii) Espaciamento:** Es importante que los árboles semilleros queden libres de competencia, para que desarrollen copas amplias y simétricas. Hay que tratar de lograr una buena distribución de los árboles semilleros, para maximizar la producción de semilla por árbol. Para lograr esta distribución muchas veces es necesario eliminar también árboles de buena forma que estén muy cerca unos de otros. Sin embargo, cuando dos árboles buenos se encuentran muy cerca el uno al otro, puede ser mejor considerarlos como una sola unidad y dejar los dos. La tala de uno de ellos podría causar el volcamiento del otro. Todos los árboles mal formados deben ser eliminados, aunque queden claros grandes y **iv) Otros:** Los árboles que muestren evidencias de enfermedades deben ser marcados para cortarlos, aunque presenten buenas características de forma y crecimiento.
- ix. La aplicación de fertilizantes puede aumentar la producción de semillas. Es evidente que la época de aplicación es crítica, se recomienda que sea justo antes

de la diferenciación de las yemas florales. Un análisis del suelo permite identificar deficiencias, programar mejor las dosis de aplicación y ayuda a identificar cuáles nutrientes estimulan la floración. En caso de acidez (pH menores de 7) se recomienda incorporar piedra caliza molida o cal. Antes de aplicar grandes dosis de fertilizantes, se debería consultar especialistas en huertos y en nutrición forestal. Es importante estudiar la época de aplicación por sus efectos sobre la floración.

- x. Generalmente la irrigación es necesaria durante los primeros años para asegurar una alta sobrevivencia y promover el crecimiento inicial de las plántulas. Cuando llega el momento de establecer un huerto, se ha invertido gran cantidad de recursos y esta inversión debe ser protegida. Sin embargo, en años posteriores, cuando los árboles son sexualmente maduros, la irrigación puede promover el crecimiento vegetativo a expensas de la actividad reproductiva.
- xi. Tan pronto como el injerto sea lo suficientemente grande para nutrir el sistema radicular y mantener buen crecimiento, las ramas del patrón deben podarse para prevenir errores en la identificación del injerto y para que estas ramas “no mejoradas” no produzcan polen. La posibilidad de eliminar el ápice dominante es acostumbrado con el fin de formar una copa amplia en forma de cáliz. Esto consiste en cortar el eje principal en la parte alta de la copa, para estimular el crecimiento lateral. La poda de ramas bajas, facilita el acceso y movimiento dentro del huerto.
- xii. Registrar todas, las actividades de mantenimiento que se realizan en el huerto. De esta forma será más fácil controlar la eficiencia del mismo en la producción de semillas.
- xiii. Con base en los registros de producción del huerto, hay que eliminar todos los árboles que produzcan muy poca semilla o que no produzcan del todo. Antes de hacer esto se debe tomar en consideración que algunas especies presentan periodicidad en la producción a nivel de grupo o de individuo.

**j) Protección.** En lo posible el huerto debe tener dos zonas bien diferenciadas: Área de producción y área de protección. Los huertos semilleros son los que suministran semillas a programas de reforestación, por lo que deben tener un cuidado especial, a diferencia de una plantación forestal común. Contra el ganado y leñadores, lo más conveniente es cercar el bosque, se puede hacer zanjas y colocar alambre de púas. Contra plagas y enfermedades, además del uso de semillas y plantas sanas, es preferible usar especies tolerantes o resistentes a enfermedades. Contra incendios, se debe instalar fajas cortafuegos alrededor de la plantación, esta se puede hacer con especies no inflamables o simplemente dejando esta zona sin vegetación.

**k) Documentación y registros.** Es muy importante recopilar y guardar en un archivo toda la información referente a todas las etapas en la vida de cada huerto para ejercer un control adecuado. Esto permitirá suministrar información clara y precisa al investigador, al responsable de los rodales y al consumidor de semillas. En lo posible un técnico debe ser el responsable del manejo y actualización de estos archivos. Como mínimo, se deberían mantener los siguientes archivos:

- i. Localización e inventario de cada huerto semillero.
- ii. Calificación de huertos semilleros. Para cada uno de ellos, deberá existir un plano detallado donde se identifique cada uno de los clones o familias existentes en cada bloque.
- iii. Descripción del sitio.

- iv. Hojas de historial, en las que se deben anotar todas las labores que se realizan, así como observaciones sobre fenología, floración, fructificación, de cada clon o familia.
- v. Una hoja de catastro o plano de la finca con la localización del huerto.
- vi. Un plan de manejo que incluya las fechas previstas para la realización de las actividades.
- vii. Un registro anual de producción de semillas de cada árbol individual. Se debe anotar la producción de semilla por bloque, por clon o familia. También es importante anotar todos los aspectos relevantes ocurridos durante el año de producción, que hayan afectado la producción de semilla. Esta información ayudará a interpretar la producción de semilla en cualquier año en particular y las necesidades de realizar otras prácticas de manejo para aumentar la producción.
- viii. Un archivo con los resultados cuantitativos de colecta, beneficio y calidad de la semilla por semestre o año para cada huerto (Cornelius y Ugarte-Guerra, 2010; ICA, 2010; Ipinza, 1998; Hartl y Clark, 1989; Zobel y Talbert, 1988).

### 9.7. Fuentes semilleras forestales en Colombia.

Una contribución significativa del mejoramiento genético forestal ha sido el desarrollo en el país de la industria de semillas certificadas. Antes de 2010, no existía en Colombia un proceso definido u oficial de certificación de la calidad genética del material para siembra, hasta que apareció la Resolución 002457 de 21 de julio de 2010: Por medio de la cual se establecen los requisitos para la inscripción de personas que se dediquen a la producción y comercialización de semillas para siembra y plántulas de especies forestales y se dictan otras disposiciones (ICA, 2010). A excepción de los cultivos agrícolas, el mejoramiento genético y el suministro de semillas (sexual y asexual) forestales en Colombia, ha estado liderado principalmente por las grandes empresas reforestadoras del sector privado. Desde el punto de vista de fuentes de semillas, los reforestadores grandes han solucionado este problema con desarrollos internos para abastecer sus necesidades. Los reforestadores medianos y pequeños recurren en gran medida (30-60%) a la oferta informal, que no garantiza la disponibilidad ni la calidad de la semilla.

Según Nieto *et al.* (2007), en Colombia, los primeros programas de mejoramiento genético y suministros de semilla forestal, se inician en la década de los 70's a partir del interés de la empresa privada en especies de pinos y eucaliptos. Para ello, se acudió a la asesoría de genetistas de la Escuela de Carolina de Norte, especialmente en los proyectos de reforestación de Smurfit Cartón de Colombia.

Según Rodríguez y Nieto (1999) en Colombia se han identificado 109 fuentes semilleras de 29 especies forestales nativas, de las cuales 11 corresponden a la categoría fuente seleccionada, una a la categoría rodal semillero, una a la categoría huerto semillero genéticamente comprobado y 96 a la categoría más baja de calidad genética que es la fuente identificada. El mayor número de fuentes semilleras se ubicó en la zona Andina, seguida de la Costa Atlántica, la Orinoquia y la Costa Pacífica. No existen cifras actualizadas sobre la dinámica y evolución de las fuentes semilleras en el país, aunque se está de acuerdo, que esto aumentado mucho en todas las zonas, ello en razón al fomento y auge del sector forestal, programas de mejoramiento genético y aumento del área plantada.

A continuación se relacionan las principales fuentes semilleras que se han implementado en el país (Nieto *et al.*, 2007):

- a) En el sector oficial instituciones como el INDERENA lideraron ensayos de introducción de especies y procedencias en los años 80's, con los cuales se logró el establecimiento de algunas fuentes semilleras y la conservación de recursos genéticos. Ejemplos puntuales de esta labor fueron el establecimiento de ensayos de procedencias de *Cariniana pyramidalis* (abasco), *Cordia alliodora* (Roble), *Gmelina arborea* (melina) y *Pinus patula* (pino), de huertos semilleros de *Cupressus lusitánica* y *Pinus patula* en Antioquia y el establecimiento de un huerto semillero de *Eucalyptus globulus* en el interior del país.
- b) Como complemento a la silvicultura intensiva, otras entidades e instituciones con asesoría internacional han implementado programas de mejoramiento genético y fuentes semilleras, a través del tiempo en Colombia, entre ellas sobresalen: Pizano - Monterrey Forestal; Refocosta; CONIF; CENICAFÉ; 3F Kanguroid; Argos; Progenesis Ltda; Cormagdalena; Ecocarbón; Compañía Ganadera Pomeno; Ganados y Madera Gamal; Reforestadora del Caribe; Familia Forestal Fernández; Universidad Distrital Francisco José de Caldas; CORPOICA; Universidad de Córdoba y Universidad del Tolima, entre otros.
- c) Desde el año 1995, CONIF ha liderado el Programa de Investigación en Semillas de Especies Forestales con diversos fondos, a la vez que ejecuta los aportes provenientes de la vigencia CIF - 2006 en acciones como el inventario, clasificación y evaluación de las áreas productoras de semilla existentes en el país y apoya la ejecución de proyectos de mejoramiento genético en conjunto con la empresa privada para *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus pellita* y proyectos de propagación vegetativa para *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*.
- d) El establecimiento de fuentes semilleras de calidad en Colombia, también han sido apoyadas y fomentadas desde el año 1994, con la creación del Programa de Investigación en Semillas de Especies Forestales Nativas (INSEFOR), apoyado con presupuesto establecido para el CIF, bajo la coordinación gubernamental del MADR y a nivel investigativo por CONIF. El INSEFOR se desarrolla a través de tres actividades básicas: i) investigación en mejoramiento genético, ii) investigación y gestión para el abastecimiento de semillas mejoradas y iii) capacitación y divulgación tecnológica (Ipinza, 1998).
- e) En roble (*Tabebuia rosea*) en la región Caribe colombiana, con el apoyo de diferentes actores forestales regionales fue posible obtener una colección inicial de árboles selectos entre todos los existentes en la región, a partir de los cuales se realizó un proceso de acopio de material (semillas y estacas vegetativas) y tras cuyo proceso, en 1998, se estableció un huerto semillero clonal en San Antero (Córdoba), del cual se cosecha un volumen estimado de 70 kg/año; cantidad suficiente para plantar 800 ha.
- f) Igualmente, y con el objeto de valorar la calidad genética de los árboles del huerto, se plantaron cinco ensayos de evaluación (ensayos de progenie) localizados en lugares representativos de las regiones donde se desarrollarán los cultivos industriales, los cuales se convertirán en huertos semilleros.
- g) En Nogal (*Cordia alliodora*) se iniciaron los programas de selección en el año 1999, por parte de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, en los que se ubicaron árboles candidatos, posteriormente avalados y reseleccionados, para llegar a un rango de 40 a 60 árboles que cumplieran las condiciones deseadas. En el año 2001 y después de suscribirse un acuerdo de cooperación entre CONIF, CENICAFÉ y Smurfit Cartón de Colombia, se lograron establecer dos huertos semilleros clonales de la especie, uno en Buenavista, Quindío, y otro, en predios de Smurfit Cartón de Colombia. Igualmente, en Chinchiná se está adecuando un nuevo predio de 3,5 ha, donde se establecerán los 35 mejores clones de C.

alliodora con dos características fundamentales: alta productividad y resistencia o tolerancia al fitoplasma, enfermedad que está poniendo en riesgo las plantaciones de la especie existentes en el país.

- h) En teca (*Tectona grandis*), particularmente, compañías como Reforestadora de la Costa (REFOCOSTA) en el Magdalena, Ganados y Maderas (GAMAL) en Córdoba y Reforestadora Caribe (Córdoba), han implementado programas de selección y reselección de razas locales de los árboles progenitores, los cuales se han utilizado para la cosecha de semilla y la producción de plantas injertadas. Estos injertos sirvieron para diseñar y plantar el primer huerto semillero clonal de esta especie en Colombia, ubicado en predios de Reforestadora de la Costa, en donde existen 625 árboles aproximadamente.
- i) Los desarrollos de fuentes semilleras al igual que la mejora genética de eucaliptos en Colombia, han estado principalmente, en cabeza de la empresa privada, como el grupo Smurfit Kappa Cartón de Colombia con *Eucalyptus grandis*. Ya se existen ensayos clonales de la población élite de tercera generación, lo que ha permitido desarrollar técnicas de producción de semillas mediante cruces controlados entre clones selectos y la implementación de minijardines clonales hidropónicos para su propagación masiva. Esta compañía cuenta con aproximadamente 40 ha en huertos semilleros de la especie, que producen 89 kg de semilla al año, lo que significa 8.180 mil plantas aproximadamente.
- j) La empresa REFOCOSTA, en Villanueva (Casanare), después de evaluar y comprobar las selecciones de varias especies, iniciaron un proceso de multiplicación clonal y producción de semillas, demostrando la potencialidad del *Eucalyptus pellita* en el desarrollo de la Orinoquia colombiana. Proceso similar ha realizado la Reforestadora San Sebastián con *Eucalyptus tereticornis* en el departamento del Magdalena.
- k) Los proceso rigurosos de selección y mejoramiento genético en ceiba (*Pachira quinata*) y melina (*Gmelina arborea*) en la Costa Atlántica, adelantado por la empresa Monterrey Forestal para ambas especies, permiten ofrecer semilla de huertos semilleros, incluso llegando a identificar clones con potencialidad de adaptación en condiciones secas o limitaciones hídricas para el Magdalena bajo seco.
- l) Actualmente Monterrey Forestal en alianza con CONIF, adelantan los protocolos de implementación y desarrollo de la infraestructura para la multiplicación clonal de melina como fuente de abastecimiento de plantas con destino a la reforestación comercial. Para el caso de la ceiba se encuentran establecidos cuatro huertos semilleros por esta compañía, ubicados en Zambrano (Bolívar) y que pueden producir 50 kg de semilla al año. Para el caso de *Gmelina arborea*, la compañía cuenta con dos huertos semilleros de producción conjunta anual cercana a los 2.200 kg/año.
- m) En pinos los programas de fuentes semilleras han sido liderados también por la empresa privada, especialmente por Cartón de Colombia, que ha priorizado a las especies *Pinus kesiya*, *Pinus maximinoii*, *Pinus tecunumanii* y *Pinus patula*. Desde el punto de producción de semillas, la compañía cuenta con 29 ha en huertos semilleros de *Pinus tecunumanii* que producen 5.5 kg de semilla al año; 25 ha en *Pinus maximinoii* que producen 1 kg de semilla anual –del cual se derivan 20.000 plantas aproximadamente– y un huerto de tres ha de *Pinus kesiya*.
- n) Recientemente, en cinco municipios del departamento de Córdoba (Colombia), se han establecido varios ensayos de evaluación de progenies (4 ha), procedencias (2 ha) y clones (2 ha) de acacia (*Acacia mangium*), teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*), los cuales una vez produzcan semillas se constituyen en huertos semilleros NO comprobados y después de su raleo genético se convertirán en huertos semilleros comprobados genéticamente (Espitia, 2010).

### 9.8. Resultados de colecta de semillas forestales en Córdoba (Colombia).

A través de la realización del proyecto: "Selección de árboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea roxb*) y acacia (*Acacia mangium willd*) en el departamento de Córdoba", durante los años 2007 a 2011, se ha determinado las épocas ideales (Tabla 9.2), para colectar semilla de árboles de varias especies forestales en el departamento de Córdoba (Espitia, 2010).

Tabla 9.2. Época ideal para recolección de semillas forestales en el departamento de Córdoba, Colombia. 2007-2010.

Especie	Localidad	Tiempo (meses)											
		Primera Producción de Semillas						Segunda Producción de Semillas					
		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
<i>Acacia mangium</i>	Puerto Libertador												
	Ayapel												
	Planeta Rica												
	Tierralta												
	San Antero												
<i>Tectona grandis</i>	Puerto Libertador												
	Canalete												
	San Antero												
	Momil												
<i>Gmelina arborea</i>	Tierralta												
<i>Cariniana pyriformis</i>	Tierralta												
	Montería												
<i>Ceiba tolúa</i>	Planeta Rica												
	Montería												
	San Antero												
<i>Tabebuia rosea</i>	Puerto Libertador												
	Ayapel												
	Planeta Rica												
	Tierralta												
	Montería												
	San Antero												

En la Tabla 9.3 se presentan los resultados de dimensiones de la semilla para varias especies forestales.

Tabla 9.3. Dimensiones de la semilla para varias especies forestales en Córdoba, Colombia, según tres tipos de tamaño durante 2007-2010 (Espitia, 2010).

Escala cualitativa	Especie forestal			
	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Cariniana pyriformis</i>



		Tamaño (cm.)			
Pequeño	Largo	0,2 – 0,3	1,5 – 1,8	1,5 – 1,7	0,7 – 0,9
	Ancho	0,3 – 0,45	1,3 – 1,5	0,8 – 1,0	0,25 – 0,3
	Grosor	0,15 – 0,20	1,2 – 1,5	0,5 – 0,7	0,2 – 0,4
Mediano	Largo	0,4 – 0,5	1,8 – 2,0	1,8 – 2,3	1,0 – 1,3
	Ancho	0,45 – 0,6	1,5 – 1,8	1,0 – 1,3	0,5 – 0,7
	Grosor	0,21 – 0,36	1,5 – 1,7	0,8 – 1,0	0,25 – 0,6
Grande	Largo	0,6 – 0,7	2,0 – 2,5	2,4 – 2,7	1,4 – 1,6
	Ancho	0,6 – 0,75	1,8 – 2,4	1,4 – 1,6	0,8 – 1,0
	Grosor	0,37 – 0,5	1,7 – 2,0	1,1 – 1,5	0,7 – 0,9

En la Tabla 9.4 se presentan los resultados de producción de semilla / árbol, número de semillas / kilogramo y peso de la semilla de varias especies forestales.

Tabla 9.4. Producción de semilla / árbol, número de semillas / kilogramo y peso de la semilla de varias especies forestales en Córdoba, Colombia. 2007-2011 (Espitia, 2010).

Variables	Especie forestal			
	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Cariniana pyriformis</i>
N° semillas / árbol / año	1ª.Producción 400 – 700	1ª.Producción 200 – 320	1ª.Producción 400 – 550	1ª.Producción 500 – 600
	2ª.Producción 250 – 500	2ª.Producción 100 – 150	2ª.Producción 350 – 420	2ª.Producción 120 – 200
N° semillas / kg	75.000 – 75.500	1.350 – 1.400	1.250 – 1.350	10.000 – 10.500
Peso de 1 semilla (g)	0.013 – 0.015	1.0 – 1.5	1.1 – 1.4	0.1 – 0.4
Peso de 100 semillas (g)	1.33 – 1.5	108.3 – 112.0	115.1 – 120.0	12.5 – 14.0

En Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), entidad responsable por la certificación de la semilla mejorada, a través de la Resolución 002457 del 21 de julio de 2010, ha definido los valores mínimos de pureza y germinación para la semilla comercial de especies forestales nativas e introducidas, que se presentan en la Tabla 9.5 (ICA, 2010).

Tabla 9.5. Valores mínimos de pureza y germinación para la semilla comercial de especies forestales nativas e introducidas.

Especies forestales nativas				
No.	Nombre científico	Nombre común	Pureza (%)	Germinación (%)
1	<i>Alnus jorullensis</i>	Aliso	44	27
2	<i>Anacardium excelsium</i>	Caracolí	100	48
3	<i>Apeiba Aspera</i>	Peinemono	100	50
4	<i>Bombacopsis quinata</i>	Ceiba tolúa	72	80
5	<i>Brosimium utile</i>	Perillo - Lechero - Sande	100	40

6	<i>Caesalpinia echinata</i>	Zapán - Palo brasil	90	60
7	<i>Calliandra cartonífera</i>	Carbonero rojo	100	47
8	<i>Calophyllum mariae</i>	Aceite María	100	85
9	<i>Cariniana pyriformis</i>	Abarco	100	47
10	<i>Cedrela montana</i>	Cedro monte	70	64
11	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro - Cedro rosado	70	68
12	<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba bongá	100	55
13	<i>Cordia alliodora</i>	Pardillo - nogal	91	49
14	<i>Cordia gerascanthus</i>	Moncoro	91	49
15	<i>Croton cupreatus</i>	Candelero, mopo	98	62
16	<i>Didinopanax morototonii</i>	Tortolito	96	35
17	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Orejero, piñon de oreja	90	60
18	<i>Erythrina edulis</i>	Chachafruto	100	87
19	<i>Erythrina fusca</i>	Cachimbo	100	25
20	<i>Erythrina poepigiana</i>	Barbatusco - cámbulo	100	37
21	<i>Hymenea courbaril</i>	Algarrobo	100	55
22	<i>Jacaranda caucana</i>	Flor morado - gualanday	84	50
23	<i>Jacarnada copaia</i>	Pavito - Chingalé	85	34
24	<i>Junglans neotrópica</i>	Cedro negro	100	50
25	<i>Laphoensia speciosa</i>	Guayacán - Guayacán de Manizales	80	55
26	<i>Meriania nobilis</i>	Amarrabollo	50	25
27	<i>Myrica Pubescens</i>	Laurel de cera	95	25
28	<i>Nectándra sp</i>	Amarillo	97	25
29	<i>Ochroma lagopus</i>	Balso	100	50
30	<i>Ocotea sp</i>	Aguacatillo	100	52
31	<i>Ocotea trianae</i>	Laurel - aguarraz	80	60
32	<i>Podocarpus rospigliosii</i>	Pino Colombiano	90	50
33	<i>Prosopis juliflora</i>	Trupillo - cuji	98	60
34	<i>Pseudosamanea guachapele</i>	Igua	90	80
35	<i>Quercus Humboldtii</i>	Roble	100	80
36	<i>Samanea saman</i>	Saman	90	75
37	<i>Shizolobium parahybum</i>	Tambor - frijolito	95	90
38	<i>Swietenia macrophylla candollei</i>	Caoba - Orura	90	55
39	<i>Tabebuia chrysantha</i>	Guayacán amarillo	70	28
40	<i>Tabebuia rosea</i>	Ocobo - Flor morado - Guayacán rosado	80	60
41	<i>Talauma sp</i>	Cobre	100	58
42	<i>Tara spinosa</i>	Dividivi - Guarnagó	100	80
43	<i>Tecoma stans</i>	Chicalá - Quillotocto	95	60
44	<i>Termilalia catappa - superba</i>	Almendro	100	65
45	<i>Xanthoxylum Tachuelo</i>	Tachuelo	100	28
46	<i>Xylosma speculiferum</i>	Corono	90	65
<b>Especies forestales introducidas</b>				
1	<i>Acacia - mearnsii - mollissima</i>	Acacia	87	69
2	<i>Acacia melanoxyllum</i>	Acacia japonesa	87	70
3	<i>Acacia decurrens</i>	Acacia negro	87	85
4	<i>Acacia mangium</i>	Acacia	87	80
5	<i>Albizzia lophanta</i>	Acacia bracatinga	95	68
6	<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	73	31
7	<i>Cupressus Lusitanica</i>	Ciprés macrocarpa	95	40
8	<i>Eucalyptus alba</i>	Eucalipto	50	60
9	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Eucalipto plateado	50	60
10	<i>Eucalyptus cinerea</i>	Eucalipto	22	90

11	<i>Eucaliptus citnodora</i>	Eucalipto	84	67
12	<i>Eucaliptus globulus</i>	Eucalipto	75	60
13	<i>Eucaliptus grandis</i>	Eucalipto	50	60
14	<i>Eucaliptus pellita</i>	Eucalipto	50	60
15	<i>Eucaliptus robusta</i>	Eucalipto	70	60
16	<i>Eucaliptus saligna</i>	Eucalipto	50	60
17	<i>Eucaliptus tereticornis</i>	Eucalipto	50	60
18	<i>Eucaliptus viminalis</i>	Eucalipto	25	94
19	<i>Franixinus Chinensis</i>	Urapan	83	80
20	<i>Gmelina arborea</i>	Melina	100	70
21	<i>Pinus Caribea</i>	Pino	85	60
22	<i>Pinus Kesiya</i>	Pino	95	70
23	<i>Pinus Oocarpa</i>	Pino	95	85
24	<i>Pinus Patula</i>	Pino	95	74
25	<i>Pinus Radiata</i>	Pino	90	62
26	<i>Tectona grandis</i>	Teca	100	70

### Bibliografía

CORNELIUS, J.; UGARTE-GUERRA, L. 2010. Introducción a la Genética y domesticación forestal para la Agroforestería y Silvicultura. *Notas de clase*. Lima, Perú. Centro mundial para la agroforestería (ICRAF). 124 p.

ESPITIA, M. 2010. Selección de árboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea roxb*) y acacia (*Acacia mangium willd*) en el departamento de Córdoba – Sexto Informe de Avance. Documento impreso. Montería, dic/15/2010. 116p.

HARTL, D.L.; CLARK, A.G. 1989. Principles of population genetics. Sinauer. 682p.

ICA. 2010. Resolución 002457 de 21 de julio de 2010: Por medio de la cual se establecen los requisitos para la inscripción de personas que se dediquen a la producción y comercialización de semillas para siembra y plántulas de especies forestales y se dictan otras disposiciones. 23p. <http://www.ica.gov.co/Normatividad/Normas-Ica/Resoluciones.aspx?page=4> (Consultado: Nov/15/2010)

IPINZA, R. 1998. Mejoramiento Genético Forestal. Santafé de Bogotá, agosto de 1998. Serie Técnica No.42. 162 p.

MADR-Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. 2007. Cadena productiva forestal-tableteros aglomerados y contrachapados-muebles y productos de madera. 176p. <http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/documentosUNINuke.asp> (Consultado: febrero/21/2009).

MURILLO, O. 1990. Estrategias a corto plazo de producción de semilla mejorada genéticamente para la reforestación en Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 10 (4): 23-27 p.

MURILLO, O. 1992a. Metodología para el diseño y establecimiento de rodales semilleros. *Tecnología en Marcha*. 11, Número especial: 3-9 p.

MURILLO, O. 1992b. Diseño de un huerto semillero de *Gmelina arborea* para la producción de semilla certificada en la zona norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 11 (3): 51-58 p.

MURILLO, O., BADILLA, YORLENY, OBANDO, GERMNAN 2001. ¿Semillas versus propagación vegetativa: hacia dónde vamos?. *Revista Forestal Latinoamericana* 16 (30): 67-77.

MURILLO, O. y BADILLA, Y. 2005. ¿Qué es mejoramiento genético forestal?. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 14 p.

NIETO, V.; IPINZA, R.; SALAS, M. 2007. Los árboles y el sexo. *Revista El Mueble y la Madera*. Vol. 57: 18-24.

ONS. 1992. Reglamento Técnico de Producción y Comercialización de Semillas y Plántulas de Viveros Forestales. San José de Costa Rica. 23p.

RESENDE, M.D. V. DE. 2007. Matemática e Estatística na Análise de Experimentos e no Melhoramento Genético. Embrapa Florestas. Colombo, PR. 362p.

RODRÍGUEZ, J. Y NIETO, V. 1999. Investigación en semillas forestales nativas. Serie Técnica No. 43. ISSN 0121-0300. Programa de Investigación en Semillas Forestales Nativas – INSEFOR. Convenio CONIF – Ministerio de Agricultura. 89p

VALLEJOS, J.; BADILLA, Y.; PICADO, F.; MURILLO, O. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. Revista Agronomía Costarricense 34(1): 105-119

ZOBEL, B. Y TALBERT, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México D.F. 545p.

## Apéndice 3

### Capítulo del libro de teca FAO/CATIE

**Murillo, O.; Monteuis, O.; Montenegro, F.; White. 2012. Capítulo: Mejoramiento genético de la teca en América Latina. En: Mitos y realidades sobre las inversiones de teca en América Latina: creando las bases para inversiones sanas. FAO-CATIE. Turrialba, Costa Rica (en edición).**

## Capítulo 6

### Mejoramiento genético de la teca en América Latina

Olman Murillo  
 Jeff Wright  
 Oliver Monteuis  
 Fernando Montenegro

#### Introducción de la teca a América Latina y material genético disponible

La teca (*Tectona grandis* Linn F.) es originaria de la India y Birmania, Tailandia e Indochina, en el continente asiático. Sin embargo, también ha sido plantada fuera de su distribución natural en otros países de Asia, África y América Latina. En la región de América Latina y el Caribe se encuentran plantaciones en algunos países de América tropical, como las islas del Caribe, Centroamérica, México y en varios países suramericanos (Keogh 1980).

Se estima que la introducción más significativa de germoplasma de teca en Latinoamérica inició en 1913 a través de Trinidad y Tobago, donde provino de Tenasserim, Myanmar (antigua Birmania) (Keogh 1979, 1980). En Panamá, las semillas provinieron de la India, del Jardín Botánico de Baroda vía Sri Lanka (antiguo Ceylán) (Behaghel 1999). La procedencia que se cultivó en el Jardín Botánico Summit Garden (Panamá) permitió luego la exportación de gran cantidad de semilla a distintos países de la región.

Se estima que en el transcurso del tiempo se introdujeron y registraron más de 15 procedencias en la región, por lo que se podrían encontrar diferentes orígenes en países como Costa Rica, Brasil, Colombia y Ecuador. En la década de 1950, la compañía bananera estableció en Quepos (Pacífico Central de Costa Rica) aproximadamente 200 ha de teca –esta es una de las plantaciones más antiguas de Centroamérica, y quizás de América Latina-. En Mato Grosso, Brasil, se dieron introducciones comerciales desde Trinidad y Tobago a finales de los años 1960 (empresa Cáceres Florestal), de donde se constituyeron las primeras fuentes semilleras del Brasil (Matricardi 1989 citado en Schnell e Schuhli y Paludzyszyn 2010). Estas plantaciones eran relativamente homogéneas, con las mismas características fenotípicas, excepto dos lotes que se asemejaban más a la teca de la India (Keogh 1979). Esto permite suponer que la procedencia Tenasserim (Birmania), introducida a través de Trinidad y Tobago, no fue la única fuente asiática de donde se introdujo material genético. Diversas compañías costarricenses importaron, en los años 1990, nuevas introducciones de germoplasma en pequeños lotes procedentes principalmente de poblaciones nativas y razas locales de Tailandia (antiguo programa de mejoramiento genético de Danida).

En la actualidad, la situación de las introducciones de teca en los diferentes países es la siguiente (Keogh 1980):

- En Honduras, las primeras semillas que se introdujeron fueron importadas de París, pero no germinaron. Los primeros árboles de teca sembrados se establecieron en la Estación Experimental Lancetilla de la United Fruit Company en 1927, con semilla proveniente de Trinidad y Tobago. En 1962 se inició un programa de cultivo de teca con las semillas de los árboles plantados en 1927; todas las plantaciones de la UFCo provinieron de esos primeros árboles.
- En Nicaragua se tiene registros de envíos de semillas de teca desde el Jardín Botánico Summit Garden en los años 1937 y 1947.
- En Cuba, la especie se introdujo desde Trinidad entre 1930-1931; entre 1937 y 1938 se recibió otro envío procedente del Jardín Botánico Summit Garden.
- En Venezuela, la semilla de teca provino de Trinidad; la primera plantación se estableció en Rancho Grande, en la localidad de Choroni (Ocumare de la Costa). Esos primeros árboles fueron cortados por mandato de las autoridades que decidieron eliminar las especies exóticas en la región (no obstante, crecieron árboles que rebrotaron de los tocones). Adicionalmente, a la estirpe traída de la isla se realizó un pedido más a Summit Garden en 1938.
- En Costa Rica, se desconoce la fecha de introducción y proveniencias; los datos disponibles son producto de una recolección en Guápiles en 1941; dichos datos se encuentran en una tarjeta en el Herbario del Museo Nacional. Los registros del Summit Garden indican que se realizaron envíos entre 1943 y 1944 que permitieron establecer dos plantaciones: una en Quepos, en terrenos de Banana Company of Costa Rica en 1943, y la segunda en Turrialba en terrenos del CATIE, aproximadamente en 19471.
- En Belice se introdujo teca en 1947 proveniente de Trinidad y otra en 1954, de fuente incierta. En El Salvador la teca llega alrededor de los años 50 con semilla del Caribe, pero no de Trinidad sino de

<sup>1</sup> Esta plantación aún existe (marzo 2012), pero su condición no es muy buena pues el lugar de plantación no corresponde a las exigencias de sitio de la especie.

Puerto Rico y de Honduras, sin embargo, estas dos no fueron las últimas introducciones, en el 54 y en el 68 se recibieron nuevas semillas de Puerto Rico y Costa de Marfil, África, respectivamente.

- En Guatemala se introdujo semilla de Summit Garden entre los años 1943-1947.
- A Colombia llegó semilla proveniente de Summit Garden en el periodo de 1944-1947, aunque también se importó de la India, Nigeria y Camerún con fines de investigación en ensayos de procedencia.

En síntesis, de acuerdo con Keogh (1980) se han identificado alrededor de 19 introducciones de semillas de teca en América Latina. Las introducciones se iniciaron a fines del siglo XIX y provinieron de Birmania y de la India. Si bien el clima y, en general, el sitio de muchos lugares de la región son aptos para el cultivo de esta especie, a pesar de los años de establecida en Latinoamérica, la especie no se ha traducido en una magnitud de plantaciones que generen una actividad económica importante. De hecho, y sin profundizar en las razones, las plantaciones de teca no se terminan de consolidar a pesar del potencial que tiene la región y de las experiencias en tecnología de reproducción y silvicultura.

Al inicio del 2000, se introdujo material genético clonal al Brasil procedente del Programa de Mejoramiento Genético de Teca en Sabah, Malasia insular (Goh et al. 2007). Algunos de esos clones han sido propagados en forma masiva y ya alcanzan hasta varios millones de plantas propagados por medio de cultivo de tejidos. Estos genotipos han sido diseminados en la región latinoamericana desde entonces.

Se podría mejorar el rastreo del origen y movimientos de la teca en la región latinoamericana mediante el uso de nuevos desarrollos con marcadores genéticos, especialmente por medio de microsatélites (Fofana et al. 2009, Verhaegen et al. 2010). Trabajos recientes en este campo ya han alcanzado progresos significativos en la región; de hecho, en Costa Rica se cuenta con nuevos servicios de apoyo a las organizaciones (Araya et al. 2005, Rojas y Murillo 2011).

#### **¿Qué se puede mejorar en las plantaciones de teca por medio de la genética?**

La experiencia con teca señala que las características que se pueden mejorar son las siguientes:

- Hábitos de crecimiento del fuste (rectitud del fuste, ramificaciones, aletones basales, grano espiral, grosor de la corteza)
- Resistencia al viento, especialmente en los primeros años de plantación
- Productividad (rendimiento y crecimiento, diámetro, altura, área basal, volumen)
- Gravedad específica y formación del duramen
- Color de la madera
- Crecimiento en suelos marginales (fertilidad, acidez, degradación)
- Tolerancia a las enfermedades

En la silvicultura moderna, las plantaciones se establecen según tres principios centrales: a) la calidad del sitio, la preparación del sitio y la nutrición; b) calidad del material genético, sea de semillas, estacas, o clones y c) la gestión de la plantación (tanto desde el punto de vista técnico como económico). La genética es la responsable por la calidad de la semilla y del material vegetativo, donde actualmente existen muchas opciones disponibles. En términos del mejoramiento genético, en la última década se inició un aceleramiento en el desarrollo de nuevos materiales y de técnicas de propagación masiva; los programas de mejoramiento están contribuyendo significativamente con el éxito y aumento de la productividad de las plantaciones de teca.

Probablemente, los primeros esfuerzos en mejoramiento genético de la teca iniciaron a principios de 1945 por parte de científicos británicos en países asiáticos (Richens 1945 en Birmania, hoy Myanmar). A finales de los años 1950 e inicios de 1960, muchos estudios impulsados por la cooperación internacional reportaban un progreso en los trabajos de mejoramiento y un avance en los rasgos de crecimiento (Gram et al. 1958, Keiding y Boonkird 1960, Mathews 1961, Kedhamath y Raizada 1961). En Latinoamérica, el primer programa de mejoramiento genético se dio, probablemente, en Trinidad y Tobago con la participación de científicos británicos (Chalmers 1962). Como en todos los programas de mejoramiento de árboles, el crecimiento y el rendimiento se convirtieron en componentes esenciales de todos los programas de mejoramiento conocidos mundialmente.

Se ha reportado un moderado a fuerte control genético para rasgos como el diámetro, altura, área basal y volumen comercial (heredabilidades en el sentido estrecho  $h^2$  desde 0,25 a 0,5) (Murillo y Badilla 2004a, 2009a).

En términos de propiedades de la madera, se han investigado varios rasgos (Leandro et al. 2003); se ha registrado una fuerte evidencia del control genético en la gravedad específica de la madera y formación temprana del duramen. En trabajos recientes se ha encontrado también un fuerte control genético del color de la madera de duramen (Moya et al. en prensa). Estos rasgos serán esenciales, considerando que existe una clara tendencia, a nivel mundial, por acortar la rotación en las plantaciones. Por lo tanto, entre los esfuerzos del mejoramiento, las propiedades de la madera juvenil serán el enfoque principal en el futuro. Afortunadamente, se ha reportado una fuerte variación genética y una tasa alta de heredabilidad en la

mayoría de estos rasgos, como se muestra en las figuras 6.1 y 6.2 (Leandro et al. 2003, Murillo y Badilla 2004a, 2009a).

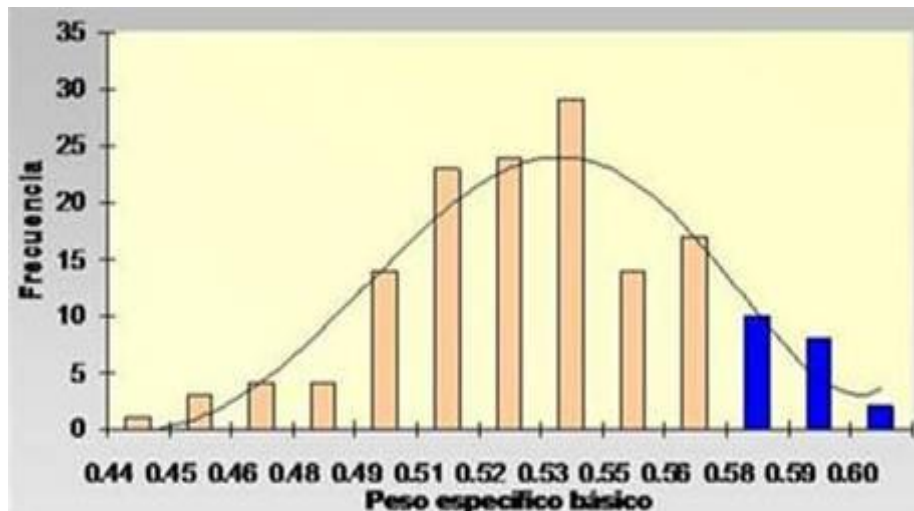


Figura 6.1 Variación en la gravedad específica de la madera de teca de cuatro años en 153 árboles de un ensayo de progenie en el Pacífico Central de Costa Rica  
Fuente: Murillo y Badilla (2004a).

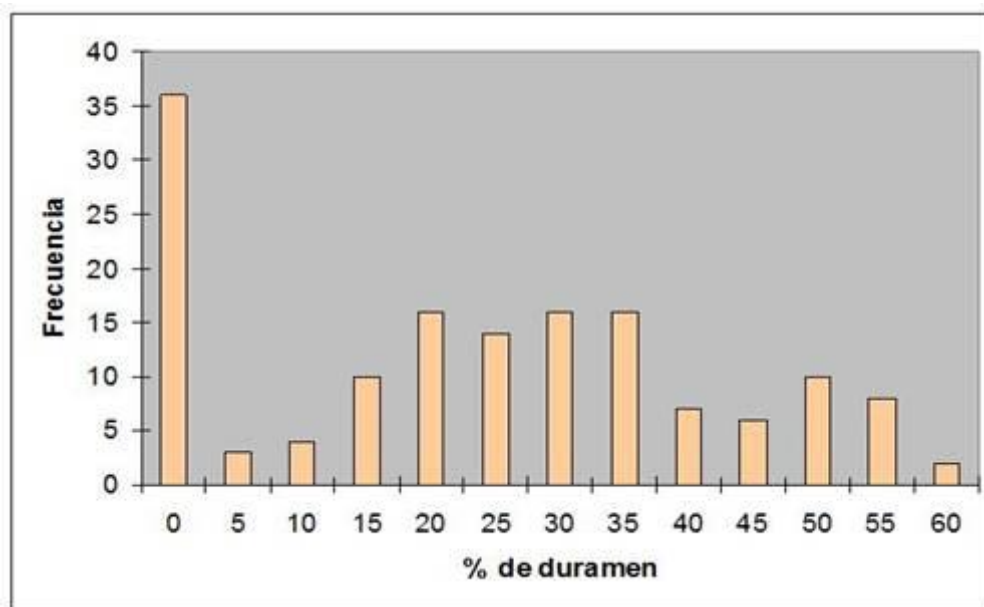


Figura 6.2 Porcentaje de aparición del duramen en teca de cuatro años en 148 árboles de un ensayo de progenie en el Pacífico Central de Costa Rica  
Fuente: Murillo y Badilla (2004a).

Resultados similares se reportan en Asia, donde los árboles de mayor tasa de crecimiento diamétrico son los que inician formación temprana de duramen (Bath 2000). Otras propiedades de la madera y de hábitos de ramificación, también se reportan como de excelentes características en árboles jóvenes producidos bajo un régimen de mayor crecimiento (Goh y Monteuis 2005, Goh et al. 2007, Chaix et al. 2008, Goh y Monteuis 2009).

El color de la madera está siendo investigado para tratar de dilucidar sus efectos ambientales y genéticos (Moya et al. en prensa). Los primeros resultados muestran la existencia de un moderado a un alto control genético ( $h^2$  desde 0,35 a 0,45). Esta propiedad es considerada como una de las más importantes en el mercado actual de madera de teca y la posibilidad de controlarla por medio del mejoramiento genético tiene un enorme potencial. Sin duda, este rasgo será incluido pronto en los programas avanzados de mejoramiento. El daño por el viento significa un serio problema en las plantaciones de teca en casi todo el mundo. Las compañías deben gastar cantidades importantes de recursos desde el primer año para prevenir los daños en el fuste; en muchos casos, el daño es de tal magnitud que reduce la altura comercial en hasta 7,5 metros

(Guzmán 2007). Recientemente, en Costa Rica se han encontrado clones de teca con un grado relevante de resistencia al viento en diferentes zonas del país, lo cual demuestra su alto control genético (Murillo y Badilla 2009a, Badilla y Murillo 2011a). Si bien aún no se conoce con certeza cuales propiedades de la madera están involucradas en este efecto mecánico (Guzmán 2007), estos resultados sugieren que se podrá alcanzar una importante reducción en el daño caudado por el viento mediante la selección y uso de estos genotipos.

La tolerancia a las enfermedades es un rasgo básico para los programas de control genético en la mayoría de los árboles plantados. Existen algunos reportes en teca que mencionan el control genético en la prevención de ataques de termitas (Sarma y Thakur 1979), la descomposición de la madera (Rudman et al. 1967) y contra la peligrosa *Hyblaea puera* (Mukhtar 1987)<sup>2</sup>. La roya de la teca (*Olivea tectonae*)<sup>3</sup> podría causar serios efectos económicos; sin embargo, un primer reporte en Costa Rica menciona un moderado a alto control genético (Arguedas et al. 2005).

La tolerancia a los suelos marginales también podría tener un impacto económico importante en las plantaciones de teca. Es sabido que la teca es una especie que demanda suelos fértiles, lo que obliga a los inversionistas a buscar suelos ricos y de alta productividad, que hoy día son muy costosos y utilizados en cultivos de mayor rentabilidad y mejor flujo de caja (Thiele 2008). En cualquier terreno de gran extensión, siempre hay sectores con áreas de suelos marginales no recomendables para el establecimiento de la teca. No hace tanto, se creó en Costa Rica la Cooperativa de Mejoramiento Genético (Genfores); datos preliminares de pruebas con clones en mejoramiento de árboles muestran claramente la diferenciación de los clones en cuanto a su tolerancia a los suelos ácidos (Gramage 2010, Badilla y Murillo 2011b). Los resultados son muy promisorios y permitirían a los inversionistas en teca expandirse hacia suelos marginales y moverse a sitios con terrenos menos costosos, en futuro cercano. Estos resultados recuerdan la importancia del apropiado trasiego del material genético antes de ser enviado indiscriminadamente de una región a otra, de un país a otro, sin antes haber sido debidamente evaluado y certificado. Estas consideraciones son de particular importancia con el uso de clones puros, que tienden a manifestar mayor especificidad y mayor riesgo si se plantan lejos de los sitios donde fueron evaluados y certificados genéticamente. La interacción genotipo/ambiente fuerte implica que el mejor material genético para una determinada región geográfica no será el mismo para otra región cercana. Este tipo de situaciones restringe la utilización comercial de algunos materiales en todos los ambientes. Después de una apropiada verificación en campo, los clones pueden ser clasificados como especialistas en determinados ambientes, o generalistas para todos los ambientes de una región.

Muchos otros rasgos que tienen que ver con la calidad del árbol han sido investigados por Genfores en Costa Rica y Colombia durante los últimos diez años (Murillo y Badilla 2004b, 2009a, 2009b, Vallejos et al. 2010, Espitia et al. 2011). Hábitos de ramificación, rectitud del fuste, gambas o aletones basales, grano en espiral, son todos rasgos de importancia económica y registran un importante control genético, que les permite ser incorporados en los programas regulares de mejoramiento. En materia económica, la calidad del fuste tiene una importante contribución al valor del árbol y su madera, tanto como lo hace el volumen en esta especie. Árboles con la mejor calidad de fuste son muy apreciados en los mercados especiales.

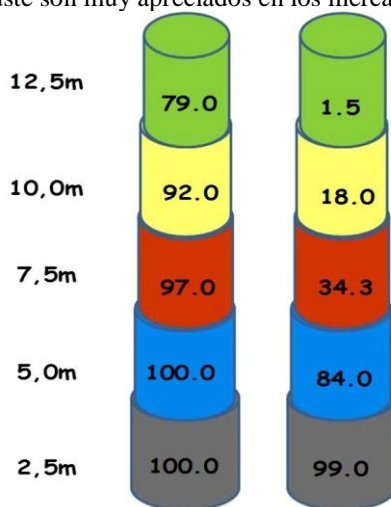


Figura 6.3 Efecto del mejoramiento en la calidad para uso industrial de las primeras cinco trozas de un árbol, expresado en el índice de calidad (de 0 a 100 = excelente). A la izquierda un árbol plus promedio de teca y a la derecha un árbol típico sin mejoramiento genético; material procedente del departamento de Córdoba, región caribe de Colombia.

<sup>2</sup> *Hyblaea puera* (defoliador de la teca) es una polilla nativa del sudeste asiático.

<sup>3</sup> Este hongo causa la aparición de manchas marrones y amarillas en las hojas; es una de las enfermedades más dañinas del follaje en viveros y plantaciones.



Fuente: Espitia et al. (2011).

### **Desarrollo de programas de mejoramiento y conservación genética de teca en América Latina**

A pesar de que la diversidad genética de la teca en la región ALC no es muy amplia, el germoplasma introducido ha dado resultados satisfactorios en términos de productividad, especialmente en tasas de crecimiento, rectitud y calidad del fuste, e incluso en propiedades de la madera (Leandro et al. 2003). Algunos esfuerzos han permitido determinar el origen de las primeras introducciones de germoplasma de teca. El uso de marcadores genéticos, principalmente microsatélites, podría ser de utilidad para esclarecer el origen, pero también para determinar la magnitud de la diversidad genética actual y para registrar o proteger cada árbol plus o clon de los programas actuales de mejoramiento genético (Fofana et al. 2009, Verhaegen et al. 2010, Rojas y Murillo 2011). Los primeros esfuerzos en mejoramiento genético en la región se dieron a inicios de los años 1980 en Hojancha, Guanacaste (Pacífico norte de Costa Rica), por medio del establecimiento de una red de rodales semilleros de alta calidad (Barquero 1984) y, posteriormente, un Banco de Semillas. Ambas iniciativas han impulsado la producción y comercialización de semilla con algún nivel de mejoramiento genético en toda la región latinoamericana (Badilla y Murillo 2011a). Los rodales semilleros son, por lo general, la primera opción para la producción de semilla mejorada a escala comercial, en forma rápida y relativamente eficiente. Su principal limitación es la baja ganancia genética esperada, que no supera el 6-8% (Murillo 1992).

En otros países de la región se vienen desarrollando trabajos en selección de árboles plus: Montenegro (2008) en Ecuador, CONIF (2009) en Colombia, Espitia et al. (2011) en Colombia y Aguiar en Mato Grosso, Brasil<sup>4</sup>. Los árboles plus ayudan al establecimiento de huertos semilleros, categoría de fuente semillera que produce semilla de mucho mayor valor genético (Zobel y Talbert 1984). Genfores ha logrado seleccionar y clonar más de 400 árboles plus de teca en Costa Rica, Colombia y, recientemente, en Ecuador y Brasil. La mayor parte de ellos se encuentran en ensayos genéticos para certificación y posible conversión en fuentes semilleras (Badilla y Murillo 2011a). Los huertos semilleros se pueden definir como una plantación constituida exclusivamente por material previamente seleccionado e identificado como árbol plus. Se localizan en sitios aislados con el fin de reducir la posibilidad de contaminación con polen de vecinos de la misma especie de bajo valor genético. Por su origen, existen dos tipos de huertos semilleros: los provenientes de la progenie de árboles plus y los provenientes de la clonación de árboles plus. Los huertos clonales en teca han demostrado su utilidad en programas de mejoramiento actualmente en desarrollo en Malasia (Chaix et al. 2011). La semilla que producen logra alcanzar ganancias genéticas superiores al 20-25%, dependiendo de la rigurosidad con que fueron seleccionados los árboles plus y del grado de aislamiento del huerto semillero. El número inicial de familias (primer tipo de huerto) o de clones en un huerto semillero puede llegar hasta unos 50-60 genotipos, que paulatinamente se reducen a unos 20 a 30, a medida que se evalúa la información que proveen los ensayos genéticos o de verificación en campo de su superioridad genética. Estos ensayos genéticos son esenciales y de gran valor, ya que son los que determinan la verdadera superioridad genética de la colección de genotipos presentes en el huerto semillero. El raleo o eliminación de los genotipos inferiores se conoce como raleo genético. Una vez ejecutado el raleo genético, la semilla producida alcanza su valor genético más alto (semilla certificada genéticamente, o semilla comprobada). La calidad genética de la semilla producida en este tipo de huertos semilleros permite no solo obtener mayor productividad y tasa de crecimiento, sino que otorga una mucha mayor seguridad o garantía de buenos resultados al inversionista. Hasta la fecha, en toda América Latina únicamente existe un huerto semillero certificado genéticamente en Hojancha, Costa Rica (Badilla y Murillo 2011a). Sin embargo, no debe olvidarse que, paralelo a la utilización de semilla certificada genéticamente, debe garantizarse la aplicación de las mejores prácticas silviculturales para obtener un alto rendimiento en una plantación de teca. No es suficiente con un buen trabajo de mejoramiento genético; el manejo oportuno de la plantación es esencial para el logro de los objetivos del inversionista.

---

<sup>4</sup> Aguiar, R. de. Febrero, 2011. Gerente de Verde Novo, Mato Grosso, Brasil. Comunicación personal

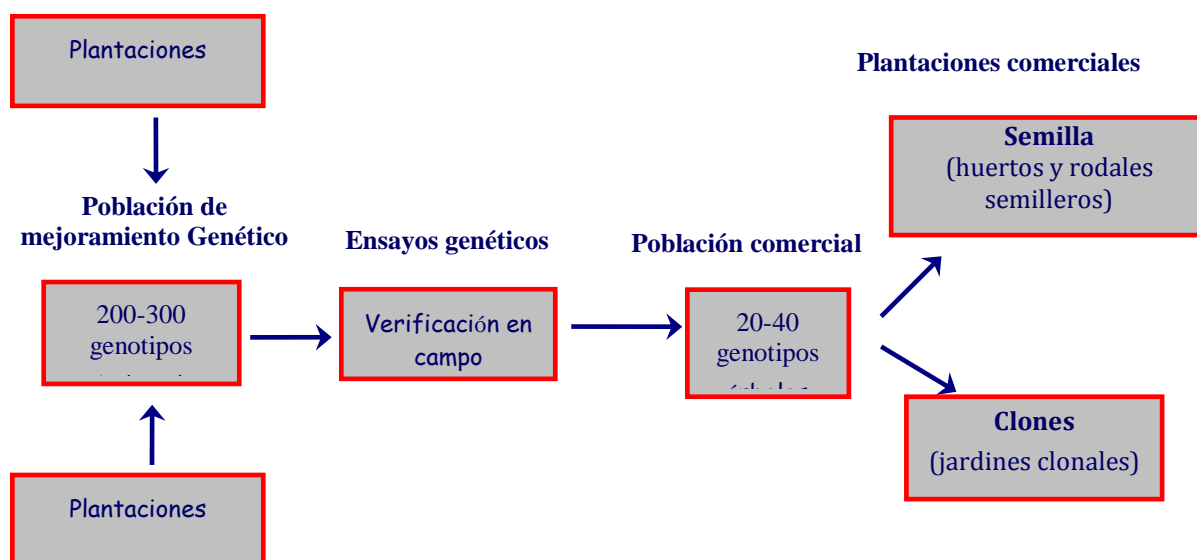


Figura 6.4 Ejemplo de un programa de mejoramiento genético en su primera generación.

El proceso de mejoramiento, se inicia con una población amplia de árboles plus que deberán ser verificados en campo mediante ensayos genéticos para finalmente utilizar a nivel comercial los individuos élite o certificados genéticamente. La liberación comercial de clones o semilla mejorada es la salida de un buen Programa de mejoramiento y no debe ocurrir sin la validación de campo previa.

Cuadro 6.1 Escenario esperado de una primer generación de un programa de mejoramiento genético, con base en una ganancia genética de un 20% en volumen, un 25% en calidad y de un año en el tiempo de cosecha.

Escenario	Dap promedio	Volumen por árbol hasta 10 m de fuste	Nº de árboles/ha calidad 1 y 2	Volumen/ha de cosecha de calidad 1 y 2
Sin mejoramiento (18 años)	35	0,67 m <sup>3</sup>	100	67 m <sup>3</sup>
Con mejoramiento (17 años)	38.3	0,80 m <sup>3</sup> (20% ganancia)	125 (25% ganancia)	100 m <sup>3</sup>

Como una nueva fuente semillera, la estrategia clonal en teca se ha venido desarrollando con gran éxito. La razón fundamental es que al clonar un árbol plus, se logra capturar el 100% de su información genética. Mientras que al tomar su semilla, cada una de sus progenies logra capturar solamente un 50% de su madre o árbol plus seleccionado. Este principio se estableció a escala comercial en los eucaliptos desde inicios de los años 1970, lo cual dio paso al desarrollo de la nueva silvicultura clonal a nivel mundial (Ahuja y Libby 1993a, 1993b; Murillo et al. 2001). Desde entonces, diversas estrategias y métodos de propagación vegetativa se han desarrollado en los últimos años. El cultivo *in vitro* irrumpió como la primera técnica de clonación en teca, inicialmente en los países asiáticos y luego en América Latina, y ya ha alcanzado escala comercial (Monteuuis 1995, 2000; Monteuuis et al. 1995, 1998; Monteuuis y Goh 1999, Daquinta et al. 2001, Goh y Monteuuis 2001, 2005, 2009; Castro et al. 2002, Go et al. 2007, Chaix et al. 2008). Sin embargo, las nuevas tecnologías de clonación *in vivo* de teca vienen suplantando rápidamente el uso de material *in vitro* en América Latina, debido a su menor costo, mayor facilidad de producción a escala comercial, menor dependencia de infraestructura y equipamiento y, en especial, debido al respaldo de programas de mejoramiento genético debidamente estructurados (Murillo et al. 2003, Murillo y Badilla 2004, 2009a; Badilla y Murillo 2011a, 2011b).

Es importante señalar, que la silvicultura clonal en teca debe estar sustentada en programas de mejoramiento genético bien estructurados y no en la mera adquisición comercial de clones en el mercado. El uso indiscriminado de clones de teca de una región o país introducido en otro país o región con características ambientales diferentes, sin haber sido validados en campo localmente, puede resultar en plantaciones de crecimiento moderado o no tan alto como se esperaba. En Costa Rica, por ejemplo, se ha observado que los

clones de teca seleccionados en el caribe del país, donde los suelos son ácidos, no muestran un crecimiento superior al ser plantados en el Pacífico norte, en suelos de mayor fertilidad y periodo seco más prolongado (Badilla y Murillo 2011b). Es recomendable que los clones se planten inicialmente en mezcla de no menos de diez genotipos, con el fin de reducir el riesgo de baja adaptabilidad a condiciones de sitio particulares. La experiencia de plantaciones clonales a escala comercial con teca se inició a finales de los años 1990 en Costa Rica (empresa Precious Woods), y ha alcanzado un desarrollo significativo con la cooperativa de mejoramiento genético Genfores. Hasta tanto los ensayos clonales en campo no permitan su certificación, no es prudente establecer plantaciones monoclonales de ningún tipo con esta especie. La mayor longevidad de una plantación de teca vs. una plantación de eucalipto sugiere mayor prudencia antes de dar el salto hacia una silvicultura monoclonal en teca. Nuevos huertos semilleros a partir de semilla y de clones se han establecido recientemente en el caribe de Colombia, los cuales podrían producir semilla mejorada genéticamente a partir del año 2013. No obstante, a partir del año 2012 ya sería posible plantar con clones comercialmente en Colombia (CONIF 2009, Espitia et al. 2010).

Una pregunta que se debe responder es **¿dónde debe un inversionista adquirir material genético de teca para plantar?** Sin duda, la mejor opción será siempre utilizar material genético que provenga de programas de mejoramiento genético que hayan seguido una rigurosa validación en campo previo a su liberación comercial. Es importante verificar que la validación del material genético haya ocurrido en condiciones de sitio semejantes a donde el inversionista desee plantar. Entre más lejos se encuentren los sitios donde fue evaluado el material, mayor será el riesgo de adaptabilidad. La probabilidad de obtener una pobre adaptabilidad será muy alta si se planta en un ambiente marginal (suelos ácidos, suelos de baja fertilidad, con periodo seco prolongado, zonas ventosas), un material evaluado en buenas condiciones de sitio. El daño por viento puede ser sumamente alto si no se utilizan genotipos que hayan sido garantizados como tolerantes al viento. En general, el riesgo es mayor con el uso de clones que con semilla mejorada debido a su menor variabilidad genética. En Costa Rica y Colombia se cuenta ya con buen material genético que ha superado varios filtros de verificación genética y permite su uso en estos países con un riesgo bajo.

Si se quiere establecer una plantación nueva en un país donde no hay una base previa de mejoramiento genético, una opción será adquirir material genético de algún programa de mejoramiento genético reconocido en la región, que garantice que los lotes (semilla o mezcla de clones) estén conformados por no menos de 20 a 25 genotipos. Paralelo a esta acción se podrá también establecer ensayos de procedencias preferiblemente nativas o de origen asiático real, junto con semilla de programas de mejoramiento genético.

No es conveniente adquirir semilla de fuentes dudosas o desconocidas, sin garantía de un trabajo riguroso de certificación genética en campo. Hoy en día prolifera en América Latina la venta de semillas y clones de teca que no proceden de programa de mejoramiento genético alguno. El riesgo de acabar con una plantación de baja productividad y pobre valor comercial es muy alto. No es aconsejable utilizar clones puros o el establecimiento de lotes monoclonales sin un trabajo de verificación previa; tampoco es recomendable utilizar lotes de semilla o mezcla de clones constituidos por pocos genotipos (< 20 genotipos).

### **Introducción de nuevas procedencias para ampliar la base genética local**

La introducción inicial de teca en la región se presume que se realizó a partir de una base genética estrecha que podría, dentro de poco tiempo, manifestar problemas de expresión de la endogamia. Existe una urgente necesidad de importar material genético de poblaciones autóctonas asiáticas, preferiblemente, por su amplia variabilidad genética; también se podría importar semilla de programas de mejoramiento genético debidamente concebidos, sin importar si fueron desarrollados en sitios fuera del lugar de origen de la teca. Todo programa de mejoramiento genético forestal pensado para desarrollar material genético superior, a lo largo varias generaciones de mejoramiento, debe establecer, desde sus orígenes, ensayos de procedencias debidamente diseñados. Con estos ensayos se buscan dos objetivos simples: 1) determinar la posible existencia de alguna población que supere claramente al material local disponible; 2) ampliar la base genética actual por medio de la introducción de genotipos sobresalientes y adaptados a las condiciones ambientales locales. Sin embargo, se hace difícil conseguir germoplasma de teca de los cuatro países de donde la especie es originaria: Myanmar (antigua Birmania), India, Laos y Tailandia. Estos países cada vez son más reuentes a exportar germoplasma de teca, debido a nuevas regulaciones sobre conservación de la biodiversidad, apoyadas por políticas nacionales proteccionistas.

La carencia o incertidumbre de la información sobre el origen de las procedencias y el número de árboles que constituyen el lote de semilla también pueden ser temas críticos. Para establecer un buen ensayo de procedencias, lo deseable es que los lotes de semilla provengan de poblaciones autóctonas o sitios de origen de la teca. Las poblaciones deben tener un tamaño mínimo importante que garantice su amplia diversidad genética. Los árboles colectados incluidos en el lote deben localizarse separados entre sí por al menos 500 metros con el fin de evitar su parentesco genético. Finalmente, el lote debe estar constituido por no menos de 20 a 25 árboles individuales. De manera ideal, la semilla debe provenir separada por árbol dentro de cada procedencia, sin embargo, esto es muy difícil de lograr. Así se lograría avanzar mucho más rápidamente con el futuro ensayo de procedencias, que podría ampliarse a un ensayo de procedencias/progenie y, permitiría evaluar simultáneamente los árboles individuales dentro de cada procedencia. Siempre que sea posible, es

importante visitar el sitio que provee las semillas o los clones, ya que tendrá un impacto importante a largo plazo en los objetivos de la introducción del germoplasma.

La escogencia de las procedencias a introducir es otro aspecto importante. Por lo general, todo programa de mejoramiento genético busca aumentar la productividad y calidad de las plantaciones. En caso de que las condiciones ambientales locales no sean marginales para la teca (suelos ácidos, poca precipitación, temperaturas frías), la oferta de posibles procedencias a evaluar será mayor. Como primer paso, mediante un análisis de homologación deberá verificarse que las condiciones ambientales entre el sitio local y el del origen de las procedencias disponibles sean similares. De lo contrario, el riesgo de baja adaptabilidad será mayor (Zobel y Talbert 1984).

A pesar de las limitaciones, gracias a los esfuerzos de Danida y Oxford, en las décadas de 1970 y 1980, se realizaron numerosos intercambios de semilla de teca entre países donantes y receptores, y se establecieron series de ensayos de procedencias en muchos países de las regiones tropicales de América, África y Asia (Cameron 1966, Keiding et al. 1986, Sandiford 1990, Dupuy y Verhaegen 1993, Behaghel 1999, Danarto y Hardiyanto 2001, Rance y Monteuis 2004, Goh y Monteuis 2009). Sin embargo, el mantenimiento y la situación general de estos rodales ha sufrido problemas por varios factores internos relacionados principalmente con la inestabilidad de las organizaciones estatales a cargo, lo cual resulta en una notable pérdida de la diversidad original del germoplasma y, en muchos casos, de la mayoría de los árboles más valiosos. La identificación de los recursos genéticos sigue siendo más y más problemática y poco fiable debido a la desaparición de información (etiquetas, carteles, números, maquetas y mapas). Además, la pérdida gradual de la capacidad de germinación de la semilla de teca no permite almacenarla por más de algunos años.

El desarrollo de las nuevas opciones de propagación vegetativa (*in vitro* e *in vivo* o de mini-estaquillas en invernadero), se ofrecen hoy día como una opción para el intercambio de material genético entre países y organizaciones. Sin embargo, persisten limitaciones para el comercio de plantas vivas en muchos países debido a las restricciones fitosanitarias. En estos casos, el material producido *in vitro* tiene mejores posibilidades que las mini-estaquillas enraizadas o *cuttings*, debido a que no requiere de sustrato para ser enviado a otro país.

#### **Derechos de propiedad y protección del germoplasma**

Los derechos de propiedad y la legislación existente sobre protección de obtenciones vegetales han creado una nueva realidad a nivel mundial. Aunque se logre un consenso general e internacional, cada país puede y tiene reglas particulares que hacen difícil evitar, mediante procedimientos exclusivamente legales, la propagación comercial y uso ilegal de semilla o clones. Por ello, las organizaciones involucradas en el mejoramiento de la teca necesitan entender las leyes sobre la protección de las variedades de plantas en sus países y en la región.

El primer paso importante es lograr el registro, en las entidades estatales, de todos y cada uno de los materiales desarrollados por los programas de mejoramiento genético. Este registro se realiza de manera rigurosa y permite establecer la identidad de cada material con su debida denominación de origen. Dado que los descriptores morfológicos pueden no ser suficientes para identificar cada genotipo, hoy en día se vienen utilizando con éxito los marcadores moleculares (AFLP, microsatélites y otros), que permiten una total confiabilidad en la determinación de la huella digital de cada individuo (Araya et al. 2005, Fofana et al. 2009, Verhaegen et al. 2010, Rojas y Murillo 2011). Sin embargo, a la fecha, su utilización en América Latina se ha logrado únicamente con las empresas miembros de GENFORES.

La protección de los derechos de los productores de germoplasma no es fácil. Es importante lograr una negociación transparente entre productores y compradores de material genético. Esta situación puede facilitar el entendimiento y continuar motivando la inversión en mejoramiento genético de teca en la región.

#### **Consideraciones generales sobre el potencial de la silvicultura clonal en teca**

En América Latina, al igual que en la mayor parte del mundo, la teca ha sido propagada principalmente por semilla hasta hace unos 6-7 años, cuando se iniciaron las plantaciones clonales a escala comercial. La propagación de la teca por semillas tiene serias desventajas:

- i. Cuantitativamente se limita a la producción de semillas (Wellendorf y Kaosa-ard 1988, White 1991) y a una determinada época del año (fenología).
- ii. Los individuos con mayor tasa de crecimiento tienden a florecer tarde, posiblemente debido a la función de la capacidad terminal del tejido de prolongar su periodo de crecimiento vegetativo el mayor tiempo posible (White 1991).
- iii. Se ha reportado que muchos de los mejores genotipos tienden a producir semilla con baja tasa de geminación (Kaosa-ard 1986, Mascarenhas et al. 1987, White 1991).
- iv. La obtención de plantas por semilla produce individuos sumamente variables, aun cuando sean medio hermanos o hermanos completos, lo cual puede tener un impacto económico alto en aspectos

como tasa de crecimiento y calidad de la madera (Bailleres y Durand 2000, Chaix et al. 2008, Chaix et al. 2011).

- v. El limitado conocimiento genético preciso sobre la heredabilidad de los rasgos con importancia económica, como los hábitos de ramificación y otros aspectos cualitativos, presentan cierto grado de incertidumbre sobre la probable ganancia genética.
- vi. La heredabilidad y la ganancia genética es significativamente inferior al uso del clon, debido a que cada plántula solamente logra capturar una porción de la información genética (Murillo et al. 2001).

Las nuevas tecnologías de producción masiva de clones permiten la producción constante de material de plantación en cualquier época del año y prácticamente sin limitación en la cantidad de individuos (Murillo et al. 2003). En contraste con la propagación de semillas, donde cada individuo es genéticamente diferente, la propagación asexual o vegetativa consiste en la duplicación de genotipos; la información genética original se preserva mediante la división por mitosis y, por tanto, también se duplica la reproducción completa de los rasgos del árbol originalmente seleccionado. Esto es esencial porque permite la captura y reproducción de toda la información genética y los rasgos de importancia económica de cada árbol plus que ha sido seleccionado (Chaix et al. 2011, Monteuis et al. 2011). Otra ventaja de la propagación vegetativa es que puede ser aplicada a cualquier individuo que, por ser muy joven aun, no produce todavía semillas fértiles o no haya iniciado su capacidad reproductiva, o en árboles que no logren producir flores o frutos debido a condiciones ambientales desfavorables (Murillo et al. 2001).

Para la propagación vegetativa en teca se pueden usar varias técnicas. El injerto ha sido empleado con éxito, pero exclusivamente para el establecimiento de huertos semilleros clonales (Emmanuel y Bagchi 1984, Bagchi et al. 1991, Tilakaratna y Dayananda 1994, Kaosa-ard 1998). La producción vegetativa masiva de la teca se inició en la década de 1990, principalmente vía micro-propagación *in vitro* (Monteuis 1995, Monteuis et al. 1995, 1998). Esto ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas eficientes adaptadas a los clones de árboles de teca seleccionados a cualquier edad (Monteuis 2000). La micro-propagación de teca ha sido exitosamente alcanzada en diferentes países en Latinoamérica como Colombia (Castro et al. 2002) y Cuba (Daquinta et al. 2001) a partir de la selección de árboles plus locales. Mientras que en Brasil y Ecuador se reproduce y comercializa masivamente material clonal introducido y de selecciones locales.

A partir del 2000, se inicia el desarrollo de una nueva línea de clonación de teca basada en la producción de minijardines clonales y obtención de mini-estaquillas en ambiente protegido o invernadero. Cada árbol plus es capturado vegetativamente a partir de uno o varios brotes basales. El material se pone a enraizar en un ambiente protegido con alta humedad relativa y alta temperatura, y luego se planta en bancales de arena en un sistema hidropónico, donde conforman pequeños lotes por cada árbol plus. Estas plantas se constituyen entonces en un minijardín clonal y sus nuevos brotes tiernos son cosechados cada 10-15 días, para producir nuevas plantas idénticas genéticamente. El sistema continúa y se puede dimensionar según la demanda de plantas del mercado. Por lo general, estos sistemas de producción clonal utilizan no menos de 20 clones a escala comercial, de una población base de no menos de 50 a 60 clones. A estas nuevas tecnologías se les conoce como producción clonal *in vivo* y han demostrado su mayor versatilidad, menor costo y mayor eficiencia en general (Murillo et al. 2003). Los costos de producción de un clon bajo esta modalidad son cada vez más bajos debido al refinamiento de las técnicas de minijardines clonales y de las condiciones de enraizamiento al aire o aeroponía (Figura 6.5). Una nueva versión, conocida como minijardines clonales temporales, permitirá aumentar la eficiencia del sistema y disminuir aún más los costos por planta clonada (Badilla y Murillo 2011a).



Figura 6.5 Sistema de enraizamiento de mini estaquillas de teca al aire (aeroponía) dentro de minitúneles, desarrollado por Genfores en Costa Rica en el 2006.

El sistema de producción clonal puede también ser empleado de manera mixta con semilla mejorada genéticamente. Con frecuencia, los huertos semilleros o determinados genotipos no producen la cantidad de semilla requerida. En estos casos se procede a germinar la poca semilla disponible y se establece como un minijardín clonal. Las plántulas nacidas se propagan masivamente mediante clonación por mini-estaquillas, cosechando los brotes tiernos quincenalmente, con lo cual se pueden obtener grandes cantidades de nuevas plantas. Esta opción de clonación masal se conoce como amplificación familiar y se utiliza también a partir de semilla obtenida por cruzamiento controlado entre dos progenitores de muy alta calidad.

El éxito de la clonación o silvicultura clonal dependerá no solamente de la apropiación correcta de las técnicas de propagación, sino principalmente, de clonar genotipos de árboles superiores genéticamente. La clonación debe considerarse como la fase comercial de un programa de mejoramiento o de conservación genética. No es, por tanto, una actividad aislada y de reproducción de materiales que no han sido debidamente validados en campo, mediante ensayos genéticos rigurosos.

El otro aspecto crucial es el uso de los clones en campo a escala comercial. El primer paso en silvicultura clonal son las plantaciones a partir de mezcla de clones. Estos lotes mixtos tendrán variabilidad genética, con lo que disminuye el riesgo de pobre adaptación de algún genotipo (clon) en particular. Esta estrategia es saludable y previene fracasos con el uso de clones, y se recomienda particularmente cuando se pretenda plantar en un ambiente nuevo con poca o ninguna experiencia previa. Una vez que los ensayos genéticos de campo den información sobre la asociación genotipo/sitio, se podrá entonces avanzar hacia el establecimiento de lotes monoclonales (Ball et al. 2000, Badilla y Murillo 2011b). Sin embargo, tal y como se mencionó anteriormente, debido a lo largo del ciclo de producción de teca, es recomendable que este proceso lleve su debido tiempo y rigor.

Las plantaciones clonales tenderán a ser mucho más uniformes, lo que facilitará enormemente su manejo. Sin embargo, es sabido que entre dos individuos obtenidos a partir de un mismo clon puede ocurrir variación; esto se conoce como efecto clonal o efecto “C” (Zobel y Talbert 1984, Hackett 1985). Primeros datos de ensayos genéticos clonales muestran una mayor uniformidad, alto rendimiento, calidad de los fustes y una reducción esperada del turno de cosecha, tal y como ha ocurrido con otras especies forestales (Wellendorf y Kaosa-ard 1988, Monteuis y Goh 1999, Goh y Monteuis 2005).

La opción clonal parece ser la mejor manera de maximizar el rendimiento de las inversiones de los productores de teca. Desde un punto de vista más general, con la creciente presión demográfica, la disponibilidad de tierras se está convirtiendo en un problema cada vez más crítico; de allí la necesidad de sacar el mejor provecho de cualquier área que pueda ser plantada. Los clones de teca de alta productividad, con calidad superior de madera y fuste y debidamente seleccionados pueden utilizarse como monocultivo o en sistemas agroforestales. En esta dirección, la selección de genotipos de teca con copa estrecha, podrían ser muy recomendables para la asociación con cultivos. Si se logra plantar los primeros años con cultivos de ciclo corto entre las líneas de la teca clonal, se posibilitaría la reducción de más del 50% de los costos totales de una plantación ordinaria de teca. Estos costos se deben a la preparación de sitio, control de malezas y fertilización, que fácilmente podrían ser “financiados” por el cultivo asociado. Esta combinación permitiría la posibilidad de obtener un flujo de caja positivo temprano debido a los cultivos asociados sembrados entre las

filas de la teca. La utilización de leguminosas como cultivos asociados beneficiaría a los árboles de teca por enriquecimiento natural del suelo.

### Orientaciones para los cultivadores de teca y los inversionistas

La teca es una especie de gran potencial y hay que hacer todo lo posible por que los que la cultivan, así como los programas de inversiones, hagan todas las operaciones de la mejor manera posible. Una de las fuentes fundamentales de mejoramiento de las inversiones es la genética, pues puede aumentar la rentabilidad del cultivo al mejorarse la forma de los árboles, su productividad, el color de la madera, las propiedades físicas y mecánicas, la resistencia a plagas y enfermedades y el crecimiento en suelos marginales. El mejoramiento genético cuenta con muchas tecnologías en aplicación, desde la utilización de semillas mejoradas de huertos genéticos y huertos clonales, hasta la reproducción clonal *in vitro* o *in vivo*. Dependiendo de la escala de las plantaciones, es recomendable contar con un programa de mejoramiento genético propio, o bien asociarse a algún programa colectivo de mejoramiento, como es el caso de Genfores. También es fundamental que los programas individuales y colectivos consideren la necesidad de ir introduciendo nuevas procedencias en sus colecciones, aun cuando esto se hace cada vez más difícil debido a que cada dueño de material genético desea proteger los derechos de propiedad.

Finalmente, en teca, la reproducción clonal está siendo ya una práctica frecuente y en un futuro próximo será difícil imaginar programas de inversiones o programas de reforestación de asociaciones de propietarios, que no consideren la producción de plantas de clonación en sus plantaciones.

### Referencias

- Ahuja, MR; Libby, WJ. 1993a. Clonal forestry I: Genetics and biotechnology. Berlin, Springer-Verlag. 277 p.
- Ahuja, MR; Libby, WJ. 1993b. Clonal Forestry II: Conservation and application. Berlin, Springer-Verlag. 240 p.
- Araya, E; Murillo, O; Aguilar, G; Rocha, O; Woolbright, S; Keim, P. 2005. Possibilities of breeding teak (*Tectona grandis*) in Costa Rica assisted by AFLP markers. Kurú 2(5). [http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista\\_Kuru/antiores/antior5/pdf/Articulo%202](http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/antiores/antior5/pdf/Articulo%202).
- Arguedas, M; Murillo, O; Ayuso, F; Madrigal, O. 2005. Variación en la resistencia de clones de teca (*Tectona grandis* L.f.) ante la infección de la roya (*Olivea tectonae* Rac.) en Costa Rica. Kurú: 2(6):10 p. [http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista\\_Kuru/antiores/antior6/pdf/Articulo%202.pdf](http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/antiores/antior6/pdf/Articulo%202.pdf)
- Badilla, Y; Murillo, O. 2011a. Avances en el mejoramiento genético de la teca en Genfores, Costa Rica. Conferencia Mundial de Teca patrocinada por CATIE, FAO y Teaknet (San José, CR, 31 oct. – 2 nov.).
- Badilla, Y; Murillo, O. 2011b. Evaluación del comportamiento de clones de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica. V Congreso Forestal Latinoamericano (Lima, PE, 18-21 oct.).
- Bagchi, SK; Gupta, PK; Arya, RS; Joshi, DN. 1991. Evaluation of graft survival percentages in *Tectona grandis*. J. Tree Sci. 10 (2): 62-65.
- Baillères, H; Durand, PY. 2000. Non-destructive techniques for wood quality assessment of plantation-grown teak. Bois et Forêts des Tropiques 263: 17-29.
- Ball, JB; Pandey, D; Hirai, S. 2000. Global overview of teak plantations. In Proc., Site, technology and productivity of teak plantations (Chiang Mai, Thaïlande, 26-29 Jan. 1999). FORSPA Publication no. 24. TEAKNET Publication no. 3. p. 11-33.
- Barquero, M. 1984. Establecimiento de rodales semilleros en el Centro Agrícola Cantonal de Hojancha, Guanacaste. Práctica de Especialidad. Cartago, Costa Rica, ITCR. 85 p.
- Bath, KM. 2000. Timber quality of teak from managed plantations of the tropics. Bois et Forêts des Tropiques, 263: 6-16.
- Behaghel, I; Monteuis, O. 1999. A propos du séminaire : «Site, technology and productivity of teak plantations (Chiang Mai, Thaïlande, 26-29 janvier 1999). Bois et Forêts des Tropiques 261: 70-79.
- Behaghel, Y. 1999. Etat des plantations de teck (*Tectona grandis* l.f.) dans le monde. Bois et Forêts des Tropiques 262: 6-18
- Cameron, AL. 1966. Genetic improvement of teak in New Guinea. Australian Forestry 30(1): 76-87.
- Castro, DR; Díaz, J; Linero, JC. 2002. Propagación clonal in vitro de árboles elite de teca (*Tectona grandis* L.) Biotechnologia 4(1): 49-53.
- Chaix, G; Monteuis, O; Goh, DKS; Bailleres, H; Boutahar, N. 2008. Quality control and mass production of teak clones for tropical plantations. In Bhat, KM; Balasundaran, M; Bhat, KV; Muralidharan, EM; Thulasidas, PK. (eds.). Proc., 2007 International symposium "Processing and marketing of Teak wood products of planted forests". Kerala Forest Research Institute, India and International Tropical Timber Organization, Japan. p. 146-157.
- Chaix, G; Monteuis, O; Garcia, C; Alloysius, D; Gidiman, J; Bacilieri, R; Goh, DKS. 2011. Genetic variation in major phenotypic traits among diverse genetic origins of teak (*Tectona grandis* L.f.) planted in Taliwas, Sabah, East Malaysia. Annals of Forest Science 68(5):1015-1026.

- Chalmers, WS. 1962. The breeding of pine (*Pinus caribaea* Mor.) and teak (*Tectona grandis* L.) in Trinidad: Some early observations. Eighth British Commonwealth Forestry Conference, East Africa. 10 p. Trinidad, Government Printing Office.
- CONIF (Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal). 2009. Mejoramiento genético forestal para las especies roble, nogal, teca y aliso. Informe Técnico Convenio No. 023-05 IICA-MADR.
- Danarto, S; Hardiyanto, EB. 2001. Results of the progeny test of teak at 12 years of age at Jember, East Java. *In Proc., Regional Seminar on Teak* (3. Yogyakarta, ID, 31 July - 4 Aug. 2000). p. 249-253.
- Daquinta, M; Ramos, L; Capote, I; Lezcano, Y; Rodríguez, R; Trina, D; Escalona, M. 2001. Micropropagación de la teca (*Tectona grandis* L.f.). *Revista Forestal Centroamericana* 35: 25-28.
- Dupuy, B; Verhaegen, D. 1993. Le teck de plantation *Tectona grandis* en Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques* 235: 9-24.
- Emmanuel, CJSK; Bagchi, S. 1984. Stock-scion compatibility in Teak (*Tectona grandis*). *Silvae Genet.* 33(2-3): 53-56.
- Espitia, M; Murillo, O; Castillo, C. 2011. Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.) en Córdoba (Colombia). *Colombia Forestal* 14(1): 81-93.
- Fofana, IJ; Ofori, D; Poitel, M; Verhaegen, D. 2009. Diversity and genetic structure of teak (*Tectona grandis* L.f) in its natural range using DNA microsatellite markers. *New Forests* 37:175-195.
- Gram, K; Larse, C. 1958. The flowering of teak (*Tectona grandis*) in aspect of tree breeding, based on observations in Thailand. *Natural History Bulletin of the Siam Society* no. 19.
- Gramage, C. 2010. Evaluación del comportamiento de clones de teca en Costa Rica. Tesis. Cartago, Costa Rica, ITCR, Escuela de Ingeniería Forestal. 72 p.
- Goh, DKS; Monteuis, O. 2001. Production of tissue-cultured teak: the Plant Biotechnology Laboratory experience. *In: Proc., Regional Seminar on Teak* (3. Yogyakarta, ID, 31 July - 4 Aug. 2000). p. 237-247.
- Goh, DKS; Monteuis, O. 2005. Rationale for developing intensive teak clonal plantations, with special reference to Sabah. *Bois et Forêts des Tropiques* 285: 5-15.
- Goh, DKS; Monteuis, O. 2009. Status of the 'YSG BIOTECH' program of building teak genetic resources in Sabah. *Bois et Forêts des Tropiques* 301: 33-49.
- Goh, DKS; Chaix, G; Bailleres, H; Monteuis, O. 2007. Mass production and quality control of teak clones for tropical plantations: The Yayasan Sabah Group and Forestry Department of Cirad Joint Project as a case study. *Bois et Forêts des Tropiques* 293: 65-77.
- Guzmán, N. 2007. Evaluación del doblamiento de teca (*Tectona grandis* L.f.) en plantaciones jóvenes de la empresa Barca S.A. Práctica de especialidad. Cartago, Costa Rica, ITCR, Escuela de Ing. Forestal. 107 p.
- Hackett, WP. 1985. Juvenility, maturation, and rejuvenation in woody plants. *Horticultural reviews* 7: 109-155.
- Kaosa-ard, A. 1986. Teak, *Tectona grandis* Linn. f.: nursery techniques, with special reference to Thailand. Copenhagen, Denmark, Danida Forest Seed Center. Seed leaflet no. 4. 42 p.
- Kaosa-ard, A. 1998. Teak breeding and improvement strategies. *In Proc., Regional seminar on Teak "Teak for the future"* (2. Yangon, Myanmar, 29.5-3.6.1995). FAO-Teaknet. p. 61-81.
- Kedharnath, S; Raizada, MB. 1961. Genetics and forest tree breeding. *In Proc., Silvicultural Conference* (10. Dehra Dun, India) Part II: 203-214.
- Keiding, H; Boonkird, Sa-Ard. 1960. Budding and grafting of teak. Nueva Delhi, India, Subcomisión de la teca. FAO/TSC 60/3.3.
- Keiding, H; Wellendorf, H; Lauridsen, EB. 1986. Evaluation of an international series of teak provenance trials. Horsholm, Denmark, Danida Forest Seed Centre. 81 p.
- Keogh, R. 1979. Does teak have a future in tropical America? *Unasylva* 31: 13-19.
- Keogh, R. 1980. Teak (*Tectona grandis*) provenances of the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia. Presented at the Rio Piedras IUFRO Meeting, Working Group S1.07.09 (Rio Piedras, Puerto Rico, 8--12 Sept.). p. 343-358
- Leandro, L; Garzón, D; Murillo, O. 2003. Potencial de mejoramiento genético de propiedades de la madera de teca. *En Simposio sobre la teca* (26-28 nov. 2003, Heredia, CR). Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Mascarenhas, AF; Kendurkar, SV; Gupta, PK; Khuspe, SS; Agrawal, DC. 1987. Teak. *In: Cell and tissue culture in forestry*. Vol.3. Bonga, JM; Durzan, DJ. (Eds.). Dordrecht, The Netherlands, Martinus Nijhoff Publishers. p. 330-315.
- Mathews, JD. 1961. A progress of forest genetics and forest tree breeding research. Report to the Government of India under FAO-Expanded Technical Assistance Program FAO-ETAP. Report no. 1349.
- Montenegro, F. 2008. Memoria técnica sobre las actividades resumidas de Fundación Forestal Juan Manuel Durini en Endesa Botrosa y el trópico, bajo la dirección ejecutiva de Fernando Montenegro S. Quito, Ecuador FFJMD 397 p.
- Monteuuis, O. 1995. Recent advances in clonal propagation of teak. *In Proc., International Workshop of BIO-REFOR* (Kangar, Malaysia, Nov. 28 - Dec. 1, 1994). p. 117-121



- Monteuuis, O. 2000. Propagating teak by cuttings and microcuttings. *In In Proc., Site, technology and productivity of teak plantations (Chiang Mai, Thailande, 26-29 Jan. 1999)*. FORSPA Publication no. 24. TEAKNET Publication no. 3. p. 209-222.
- Monteuuis, O. Vallauri, D; Poupard, C; Hazard, L; Yusof, Y; Wahap Latip, A; Garcia, C; Chauvière, M. 1995. Propagation clonale de tecks (*Tectona grandis*) matures par bouturage horticole. *Bois et Forêts des Tropiques* 243: 25-39.
- Monteuuis, O; Bon, M-C; Goh, DKS. 1998. Teak propagation by in vitro culture. *Bois et Forêts des Tropiques* 256: 43-53.
- Monteuuis, O; Goh, DKS. 1999. About the use of clones in teak. *Bois et Forêts des Tropiques* 261: 28-38.
- Monteuuis, O; Goh, DKS; Garcia, C; Alloysius, D; Gidiman, J; Bacilieri, R; Chaix, G. 2011. Genetic variation of growth and tree quality traits among 42 diverse genetic origins of *Tectona grandis* planted under humid tropical conditions in Sabah, East Malaysia. *Tree Genetics and Genomes* 7(6):1263-1275.
- Moya,R., Marín, J.D., Murillo, O., Leandro, L. 2013. Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control (Accept)
- Mukhtar, A. 1987. Relative resistance of different clones of *Tectona grandis* to teak defoliator, *Hyblaea puera* Cram (Lepidoptera: *Hyblaeidae*) in south India. *Indian Forester* 113(4): 281-286.
- Murillo, O. 1992. Metodología para el diseño y establecimiento de rodales semilleros. *Tecnología en Marcha (ITCR)* 11 (Número especial): 3-9.
- Murillo, O; Badilla, Y; Obando, G. 2001. Semillas versus propagación vegetativa: ¿hacia dónde vamos? *Revista Forestal Latinoamericana* 16 (30): 67-77.
- Murillo, O; Rojas, JL; Badilla, Y. 2003. Reforestación Clonal. 2 ed. Cartago, Costa Rica, ITCR. 36 p.
- Murillo, O; Badilla, Y. 2004a. Breeding teak in Costa Rica. *In IUFRO Meeting, Forest Genetics and Genomics.* (1-5 nov., Charleston, South Carolina, USA). [www.ncsu.edu/feop/iufro\\_genetics2004/proceedings.pdf](http://www.ncsu.edu/feop/iufro_genetics2004/proceedings.pdf)
- Murillo, O; Badilla, Y. 2004b. Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Cartago, Costa Rica, ITCR. 51 p.
- Murillo, O; Badilla, Y. 2009a. Mejora genética de la teca: avances y tendencias en los últimos 10 años. *En Congreso Internacional del Cultivo de Teca (1. 16-17 set., 2009, Universidad de Quevedo, Ecuador)*.
- Murillo, O; Badilla, Y. 2009b. Calidad y valor en pie de plantaciones de teca en Costa Rica. *En Congreso Internacional del Cultivo de Teca (1. 16-17 set., 2009, Universidad de Quevedo, Ecuador)*.
- Rance, W; Monteuuis, O. 2004. Teak in Tanzania : Overview of the context. *Bois et Forêts des Tropiques* 279: 5-10.
- Richens, RH. 1945. Forest tree breeding and genetics. Burma, Imperial Agricultural Bulletin no. 8. 79 p.
- Rojas, F; Murillo, O. 2011. Avance en el uso de marcadores moleculares en la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal Genfores. *En Congreso Forestal Latinoamericano (5. 18-21 oct., Lima, Perú)*.
- Rudman, P. Costa, EWB da; Gay, FJ. 1967. Wood quality in plus trees of teak (*Tectona grandis*). *Silvae Genetica* 16(3): 102-105.
- Sandiford, M. 1990. An account of the identification of existing *Tectona grandis* populations in Solomon Islands: A first step toward the improvement of *Tectona grandis*. *Forestry Research Note N° 61-01/90*. 15 p.
- Schnell e Schuhli, G; Paludzyszyn, F. 2010. O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético. *Pesquisa Florestal Brasileira (Colombo)* 30(63): 217-230.
- Sen Sarma, PK; Thakur, ML. 1979. Relative termite resistance of heartwood of teak trees from known seed sources. *Holzforschung und Holzverwertung* 31(1): 14-16.
- Thiele, H. 2008. Variables edáficas que afectan el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en la vertiente del Pacífico de Costa Rica. Tesis M.Sc. San José, Costa Rica, UCR. Sistemas de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. 184 p.
- Tilakaratna, D; Dayananda, KJT. 1994. Forest tree improvement in Sri Lanka: a baseline study. Rome, Italy, UNDP/FAO Working Paper N°3. 23 p.
- Vallejos, J; Badilla, Y; Picado, F; Murillo, O. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Revista Agronomía Costarricense* 34(1): 105-119.
- Verhaegen, D; Fofana, IJ; Logossa, ZA; Ofori, D. 2010. What is the genetic origin of teak (*Tectona grandis*) introduced in Africa and in Indonesia? *Tree Genetics and Genomes* 6(5):717-733.
- Wellendorf, H; Kaosa-ard A. 1988. Teak improvement strategy in Thailand. *In Proc., Site, technology and productivity of teak plantations (Chiang Mai, Thailande, 26-29 Jan. 1999)*. FORSPA Publication no. 24. TEAKNET Publication no. 3.
- White, KJ. 1991. Teak: some aspects of research and development. FAO Regional Office for Asia and the Pacific. Publication no. 17. 53p.
- Zobel, B; Talbert, J. 1984. Applied Forest Tree Improvement. New York, Wiley & Sons. 505 p.

