

**RETORNO ECONOMICO DEL MEJORAMIENTO GENETICO FORESTAL EN  
CONDICIONES TROPICALES Y SUBTROPICALES**

**(Economic returns from tree improvement in tropical and  
sub-tropical conditions)**

**NOTA TECNICA No. 36  
(Complementada con Nota de Clase A-2)**

**Por**

**R.L. Willan**

**Humlebaek, Dinamarca. Junio 1988**

**CONTENIDO**

	<b>PAGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>111</b>
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>113</b>
<b>2. SELECCION ENTRE ESPECIES</b>	<b>115</b>
<b>3. INVESTIGACION EN PROCEDENCIAS</b>	<b>116</b>
<b>4. SELECCION DENTRO DE PROCEDENCIAS</b>	<b>124</b>
<b>5. RESUMEN DE LAS GANANCIAS ESPERADAS EN LAS PRIMERAS ETAPAS DEL MEJORAMIENTO FORESTAL</b>	<b>129</b>
<b>6. ASPECTOS ECONOMICOS</b>	<b>130</b>
<b>7. LITERATURA SELECCIONADA</b>	<b>137</b>
<b>8. ANEXOS</b>	<b>141</b>
1. Ejemplos de resultados de ensayos de procedencias en los trópicos y subtrópicos	
2. Cálculo de los costos, ingresos y rentabilidad de un programa hipotético de investigación de procedencias	

## RESUMEN

La evidencia disponible sugiere que los beneficios derivados del mejoramiento genético forestal en los trópicos y subtrópicos, debe ser por lo menos como los obtenidos en las regiones templadas. Un estimado razonable de las ganancias genéticas que se pueden lograr en la selección entre procedencias y en el primer ciclo de selección individual dentro de procedencias (huertos semilleros no raleados genéticamente), aplicables a plantaciones comerciales a gran escala, se resumen a continuación:

## GANANCIA EN EL VALOR DE LAS PLANTACIONES COMERCIALES DERIVADA DE LAS PRIMERAS ETAPAS DE MEJORAMIENTO

Grado de variación entre procedencias	Ganancia esperada de la selección de procedencias (%)	Grado de variación dentro de procedencias	Ganancia esperada de la selección individual * (%)	Ganancia total esperada (%)
Alto	10-20	Alto	15-30	25-50
	10-20	moderado	5-15	15-35
	10-20	bajo	1-5	11-25
Moderado	5-10	Alto	15-30	20-40
	5-10	moderado	5-15	10-25
	5-10	bajo	1-5	6-15
Bajo	1-5	Alto	15-30	16-35
	1-5	moderado	5-15	6-20
	1-5	bajo	1-5	2-10

El retorno económico, en términos de la Tasa Interna de Retorno (TIR), debe exceder el 10% para la selección de procedencias y alcanzar entre el 12% y 15% para el primer ciclo de selección dentro de procedencias, en especies con una variabilidad alta o moderada. Cuando las ganancias del mejoramiento forestal se aplican a grandes áreas, los beneficios económicos pueden alcanzar millones de dólares.

\* Huerto semillero no genéticamente raleado

Los costos de ciertas operaciones (Ej: alta intensidad de selección de árboles plus en grandes áreas de bosque), son en gran medida independientes de la escala de plantación del material mejorado. Por esta razón, sólo las empresas que efectúan reforestación a gran escala pueden normalmente realizar sus propios programas de investigación y desarrollo.

Las empresas pequeñas pueden obtener beneficios similares de la compra de semilla genéticamente mejorada por las empresas mayores. Debido a que la semilla representa sólo un pequeño porcentaje de los costos de reforestación, los proyectos de plantación pueden permitirse pagar por semilla genéticamente superior hasta 20 veces el precio de la semilla comercial estándar.

El aumento en los rendimientos ofrece varias alternativas para los planificadores forestales, tales como:

1. Llenar la creciente demanda con la misma semilla del área de plantación.
2. Llenar una demanda estática con una área más reducida, ya sea con mayor calidad de sitio o mejor accesibilidad promedio.
3. Llenar una demanda estática con la misma área pero con una rotación más corta.

El retorno de la inversión puede aumentar ya sea por reducción de los gastos o por aumento de los ingresos. La mayoría de los análisis económicos publicados han evaluado los beneficios derivados del incremento en el rendimiento en las cosechas, y por lo tanto, de los ingresos. También se pueden obtener beneficios económicos significativos de, por ejemplo, la reducción de los costos por limpiezas debido a un cierre de las copas más temprano por el uso de genotipos de crecimiento más rápido, o de la reducción en los costos de los raleos por la utilización de métodos mecánicos sistemáticos, aplicables por la mayor uniformidad de las plantaciones.

## 1. INTRODUCCION

En el pasado se han publicado varios artículos sobre el retorno económico esperado del mejoramiento forestal. La mayoría se refiere a la experiencia en las regiones templadas. La presente nota intenta resumir la evidencia existente con respecto al retorno esperado del mejoramiento forestal en condiciones tropicales y subtropicales.

El mejoramiento genético consiste en la manipulación de la variación natural existente. Debido a que la mayoría de las especies arbóreas son predominantemente exógamas (fecundación cruzada), los bosques del mundo han desarrollado durante miles de años una base genética con una variación impresionante, que brinda a los genetistas forestales una perspectiva alentadora. Los mejoradores deben seleccionar dentro de esta variación, aquel material genético que sea útil para aumentar la calidad de los nuevos bosques, al mismo tiempo que conservar lo máximo posible de la variación genética total para uso de las generaciones futuras. Esta variación genética se encuentra ahora amenazada como nunca antes por la actividad de hombre.

La variación fenotípica (variación total) es el resultado del efecto combinado de:

1. Variación en el estado de desarrollo (edad). Por ejemplo, un árbol maduro es más grande que una plántula de vivero de la misma especie.
2. Variación ambiental. Por ejemplo, un árbol en un sitio fértil es más grande que un árbol de la misma especie y de la misma edad en un sitio infértil.
3. Variación genética. Un árbol genéticamente superior tiene un mayor desarrollo que otro genéticamente inferior de la misma especie, de la misma edad y creciendo en la misma calidad de sitio.

El arte del mejorador forestal consiste en identificar el elemento de la variación genética que deba pasar de los padres a la progenie (los hijos) y separarlo de los efectos aleatorios del desarrollo y del ambiente. Este puede ser un proceso difícil y largo, e involucra un sistema completo de ensayos de especies, procedencias y de progenie; pero la base del mejoramiento forestal descansa en la posibilidad de seleccionar árboles que posean, en una o varias características de interés, una superioridad heredable.

Las etapas del proceso de selección y mejoramiento son:

1. Selección entre especies.
2. Selección entre poblaciones dentro de una especie (subespecies o razas, variedades, procedencias, fuentes de semilla, etc.).
3. Selección entre individuos dentro de poblaciones superiores.
4. Cruzamiento controlado, incluyendo recombinación e hibridación entre especies, poblaciones, padres y progenies selectas.

El mejoramiento debe ser complementado por el desarrollo de técnicas adecuadas de propagación masiva, sexuales o vegetativas, que aseguren que los genotipos superiores se puedan usar en plantaciones a gran escala.

En general, la madera es el producto más importante de los árboles. Para la producción de madera, la tasa de crecimiento, en altura, diámetro, área basal o volumen, es la característica considerada con mayor frecuencia en programas de mejoramiento. Tiene la ventaja de que se puede cuantificar fácilmente. Por lo general, el volumen se evalúa en rodales maduros y la altura y diámetro en rodales jóvenes.

La medición de la gravedad específica de una muestra de árboles permite convertir el volumen producido por hectárea en producción en peso. En el caso de madera para pulpa se incluyen otras características importantes tales como longitud de fibra, diámetro de las células, grosor de la pared celular y proporción de madera de reacción.

La rectitud del fuste y los hábitos de ramificación (incluyendo incidencia de bifurcación) afectan los costos de manipulación y el porcentaje de pérdidas en la conversión a madera industrial. La producción de volumen se puede convertir fácilmente a valores de producción, mientras que la conversión a términos monetarios de estimados de calidad, los cuales normalmente se evalúan en una escala de grados, a menudo representa un problema. Esto se agrava si el mercado local de la madera no ha desarrollado una gradiente claro de precios dependiente del diámetro de la troza o del grado de defectos.

La relación seguridad/riesgo está estrechamente relacionada con la adaptabilidad al clima y los suelos del sitio y con la susceptibilidad a las plagas y enfermedades locales. En algunos casos la aplicación de tratamientos químicos baratos puede ser un método de control más eficiente que un largo programa de mejora (*Dothristoma* en *Pinus radiata* en Nueva Zelanda). En otros casos, el descubrimiento o desarrollo de genotipos resistentes puede o podría ser crítico para el éxito o fracaso de programas importantes de plantación (resistencia a *Hypsipyla* en Meliáceas). Un problema particular de adaptabilidad es la necesidad de sobrevivir a condiciones climáticas anormalmente severas que pueden ocurrir solo a intervalos

largos. En algunos casos, una procedencia no nativa puede ser la de mejor crecimiento por varios años pero puede sufrir pérdidas catastróficas en un año excepcionalmente seco o frío.

Poco se sabe acerca de los patrones de variación de caracteres importantes en especies usadas en forestería social (producción de forraje, contenido químico, sombra o mejoramiento del suelo, etc.), pero no existe razón para dudar que su potencial de mejoramiento en producción y calidad sea tan grande como el de las especies maderables.

## 2. SELECCION ENTRE ESPECIES

Es obvio que existe una gran variación entre las especies en muchas características. Aunque el clima y las condiciones de suelo sean ideales y uniformes, el potencial de crecimiento varía enormemente, aún entre especies de un mismo género. Por ejemplo, *Eucalyptus regnans* puede crecer hasta 90 m de altura, con fuste recto y cilíndrico, mientras que el *E. pyriformis* presenta árboles con tallos múltiples y casi nunca crece más de 6 m. La producción de volumen también varía mucho entre especies que están igualmente bien adaptadas al sitio y que sobreviven y se mantienen perfectamente saludables.

El tipo y la calidad de la madera también presenta una variación enorme. La teca (*Tectona grandis*) y el genízaro (*Albizia saman*) tienen madera de mejor calidad para muebles que, por ejemplo, la ceiba (*Ceiba pentandra*). Los eucaliptos son mejores productores de leña que los pinos tropicales. Otras especies tienen gran valor para la producción de otros productos que no sean leña o madera. Las especies más adecuadas para la producción de forraje, mejoramiento del suelo, sombra o protección, a menudo no son las mismas que aquellas para madera de aserrío, aunque en ocasiones existen algunas que pueden ser aptas tanto para silvicultura social como para uso industrial.

Por las enormes diferencias existentes entre especies en muchos aspectos, resulta claro que la adecuada selección de las mismas es un requisito esencial y crucial para todas las etapas posteriores de mejoramiento forestal. El proceso de selección se debe guiar por los siguientes principios:

1. Definir claramente el objetivo de producción o beneficio deseado antes de iniciar el programa de selección de especies. Un crecimiento rápido y vigoroso no tiene ningún valor si el producto final no es el apropiado. Existen pocas especies que son realmente de uso múltiple, por lo que se deben identificar los grupos de posibles especies con diferentes propósitos para los ensayos de selección de especies.

2. Por definición, las especies nativas deben ser las mejores adaptadas al sitio, a menos que este haya sido fuertemente alterado. Las especies nativas siempre se deben considerar en el programa de ensayos.
3. Las especies exóticas pueden estar tan bien adaptadas como las especies nativas, si provienen de ecosistemas y sitios con condiciones similares al lugar de introducción.
4. Algunas especies se comportan mejor como exóticas que en sus hábitats naturales, probablemente debido, entre otras razones, a que la introducción de la semilla se hizo sin importar ninguna de sus plagas naturales. *Pinus radiata* es un ejemplo de una especie de poca relevancia en su rango natural pero que presenta un comportamiento sobresaliente cuando se planta como exótica.
5. Aunque algunas especies son menos específicas que otras respecto al sitio, no existen especies adecuadas para todos los sitios y climas. Por esta razón, las pruebas de selección deben estar dirigidas hacia la evaluación del comportamiento de las especies en un determinado tipo de sitio y se debe tener cuidado de no extrapolar los resultados a sitios con características diferentes.
6. La selección de procedencias se considera posteriormente. Su importancia fue reconocida por los forestales hace más de 50 años. Por esta razón, aún en los ensayos de especies, la fuente de semilla de cada especie probada se debe conocer y registrar. De esta forma, el ensayo no sólo compara la especie A con la especie B sino que compara la fuente X de la especie A con la fuente Y de la especie B, cuando ambas se plantan en el tipo de sitio del ensayo.

### 3. INVESTIGACION EN PROCEDENCIAS

La mayoría de los primeros ensayos de procedencias se realizaron en las regiones templadas. Uno de los más viejos es la serie de IUFRO con *Picea abies* que se inició en varios países en 1938. En términos de producción de volumen durante todo el periodo (41 años), la mejor procedencia produjo cerca de tres veces más que la peor (de las que estaban bien representadas en el ensayo) (Stahl, 1986). La superioridad de la mejor procedencia sobre el promedio de todas las demás fue de 46% y sobre la población local no mejorada fue de 39%.



Otras conclusiones de este ensayo fueron:

- a.- Las mejores procedencias pueden ser seleccionadas sobre la base de crecimiento en altura a los 8 años de edad o a un octavo de la rotación de esta especie.
- b.- Una diferencia de 0.5 m en altura (13 % del promedio) a los 14 años de edad, corresponde a una diferencia en la producción de volumen de 100 m<sup>3</sup> de madera sólida de los fustes (21 % del promedio) a la edad de 41 años. Sin embargo, las diferencias en producción de volumen son en cierta manera exageradas debido al pequeño tamaño de las parcelas y a la buena calidad de sitio.
- c.- Las mejores procedencias producen continuamente volúmenes más altos que el promedio de las demás procedencias. Por lo tanto, el efecto de una correcta selección puede ser comparada al incremento en calidad de sitio.
- d.- Los rodales semilleros y las denominadas "razas locales" figuran predominantemente entre las procedencias más productivas.

En ensayos con *Picea sitchensis* (8-10 años) en Dinamarca y Escocia las mejores procedencias superaron en crecimiento en altura en 11-16% al promedio general (Madsen, 1984; Lines y Samuel, 1984). En Canadá, con *P. glauca* evaluada en 15 sitios, las procedencias más rápidas en crecimiento en altura superaron en un 20% al promedio y en 17% a la procedencia local (Carlisle y Teich, 1971).

En condiciones templadas más cálidas o subtropicales se han obtenido ganancias de magnitud similar. Tal es el caso reportado por Kraus, Wells y Sluder (1984) sobre *Pinus taeda* en el sureste de los Estados Unidos, en donde encontraron grandes diferencias a temprana edad (15 a 20 años) del orden del 10 al 15 %, mientras la diferencia en producción de volumen entre la mejor y el promedio de las procedencias, a la edad de 25 a 35 años, varió entre 30 y 80 %.

En general, los ensayos en los trópicos son mucho más recientes que en las zonas templadas. Sin embargo, los resultados publicados de ensayos en el trópico y subtrópico indican que las diferencias entre procedencias son tan grandes como las de las especies de zonas templadas. Debido a que las tasas de crecimiento generalmente son mucho mayores y las rotaciones más cortas en los trópicos, una ganancia genética dada es más valiosa, tanto en términos de producción de volumen por hectárea como en valor descontado (valor actual neto - VAN).

En el caso de *Eucalyptus camaldulensis*, especie de amplia distribución en Australia, la relación en producción de volumen entre la mejor y peor procedencia es de 3:1 a los 6 años en Nigeria y de 8:1 a los 10 años en Israel (FAO, 1981). Sin embargo, una comparación más útil es la que se realiza entre la mejor procedencia y

el promedio de todas las del ensayo. Cuando la especie es nativa, es valiosa la comparación con la procedencia local. También es de gran interés, cuando la especie es exótica y con disponibilidad de semilla limitada, la comparación de la "nueva" mejor procedencia con la que ha estado realmente disponible (ej. Mountain Pine Ridge, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*).

En Costa Rica, se han presentado resultados similares y aún mejores con varias especies tropicales de rotación corta, tales como *Acacia mangium*, *Eucalyptus urophylla*, *Cordia alliodora*, *Gmelina arborea*, *Pinus caribaea* var *hondurensis* y *Pinus oocarpa/tecunumanii*, entre otras, en donde las diferencias entre procedencias también son notables. La superioridad en producción de volumen total entre la mejor procedencia y el promedio de todas las demás evaluadas fue generalmente mayor del 75% y pudo alcanzar en algunos casos más del 200% (Corea *et al*, 1992).

En los últimos años ha aumentado la preocupación sobre los efectos a largo plazo de la reducción del acervo (pool) genético de las especies de plantación que puede resultar como consecuencia del uso de unos pocos genotipos superiores de una sola procedencia. Por esta razón, resulta prudente mantener una base genética amplia usando una proporción de varias procedencias superiores (tres, por ejemplo) según los resultados de los ensayos, en vez de concentrarse sólo en la mejor procedencia. La ganancia inmediata puede ser un poco más pequeña, pero esto se compensa con una disminución en el riesgo de una reducción excesiva de la base genética.

En el Anexo 1 se presentan ejemplos sobre resultados de ensayos de procedencias en los trópicos y subtrópicos, incluyendo pinos, eucaliptos y varias latifoliadas tropicales. Cuando se dispone de datos se hacen las siguientes comparaciones:

- a) La mejor procedencia con la media de todas las procedencias en el ensayo.
- b) La media de las "mejores" tres procedencias con la media de todas las procedencias en el ensayo.
- c) La mejor procedencia con la procedencia local o la procedencia en uso.

La mayoría de los resultados se refieren a la tasa de crecimiento en altura, diámetro, área basal o volumen, pero se incluyen algunas comparaciones de rectitud del fuste y gravedad específica de la madera.

A menos que se especifique otra cosa, las ganancias citadas en los siguientes párrafos se refieren a la comparación entre la media de las tres procedencias más rápidas y la media de todas las procedencias evaluadas.

Para la media de las tres mejores procedencias, la ganancia genética más alta en crecimiento inicial en altura ocurrió en *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. cloeziana* y *Pinus taeda*. El mejoramiento de estas especies varía de 15% a 34% a edades de 4.5 a 7 años. En *Eucalyptus tereticornis*, *Pinus oocarpa/tecunumanii*, *Pinus elliottii* y *Terminalia superba* las ganancias fueron de 10 a 14%. Algunos ensayos individuales de *P. caribaea* var. *hondurensis* mostraron diferencias de 5-6%, pero el promedio de 15 sitios de ensayos internacionales de esta especie fue de 4% y en un ensayo fue de solamente 1%. En ensayos de *P. patula* en Zimbabwe, la mejor procedencia fue 3% superior al promedio.

En ensayos donde se evaluó el incremento en diámetro y altura, el mejoramiento en diámetro fue similar o un poco inferior al de la altura. En los ensayos de *Tectona grandis*, el mejoramiento varió entre 6% y 12% para incremento diamétrico (tres ensayos) y entre 3% y 14% para el incremento en área basal por hectárea (otros 4 ensayos). En *Gmelina arborea*, los valores respectivos fueron 8% a 15% para diámetro (5 ensayos) y 6% a 18% para incremento en área basal (otros 3 ensayos). Los valores para teca y melina son estimados de las diferencias genética (Keiding *et al.*, 1986; Lauridsen, *et al.*, 1987), mientras que para las otras especies son expresiones de diferencias fenotípicas.

En ensayos en los que se midió el área basal o el volumen por hectárea, así como la altura, el mejoramiento en área basal (tres mejores procedencias) fue de 1,5 a 5 veces el obtenido para incremento en altura, mientras que el aumento en producción de volumen fue de 2 a 6 veces mayor. Algunas de las diferencias en volumen se deben descontar debido a varias razones: influencia de tamaño pequeño de la parcela, sobrevivencia variable e influencia creciente de la competencia diferencial conforme crecen los rodales.

La magnitud de las diferencias entre procedencias varía considerablemente de especie a especie en los trópicos, tal como ocurre en las regiones templadas. En Norte América, *Picea glauca*, la cual tiene un rango amplio de distribución natural que abarca diferentes condiciones climáticas y de suelo, ha mostrado diferencias de al menos un 20% entre la procedencia más rápida y el promedio, mientras que en *Pinus resinosa*, el cual tiene un rango restringido, esta diferencia es de menos del 10% (Carlisle y Teich, 1975). En la zona templada cálida o subtropical *Pinus taeda*, con un rango amplio de distribución, muestra mayor variación en la tasa de crecimiento que *Pinus elliottii*, que tiene un rango de distribución más restringido. Ensayos en Africa han confirmado los resultados de ensayos similares con estas dos especies en Estados Unidos. *Eucalyptus camaldulensis* es una especie con un gran rango de distribución natural en Australia y también exhibe grandes diferencias entre procedencias en ensayos comparativos. En resumen, con base en estos y otros resultados en el trópico y subtrópico, y considerando las diferencias en crecimiento inicial en altura entre las tres mejores procedencias y el promedio, las especies se pueden clasificar en:

1. "Muy variables": pueden mostrar un mejoramiento de 15-30%
2. "Moderadamente variables": mejoramiento posible de 5-15%
3. "Poco variables": mejoramiento posible de 1-5%

La clasificación anterior es arbitraria y, para la mayoría de especies tropicales, todavía no se posee una buena estimación de su variabilidad genética total. Sin embargo, los resultados muestran que los beneficios de la selección de procedencias son mayores en unas especies que en otras, dependiendo de su variabilidad.

En los ensayos evaluados, las especies *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus cloeziana* y *Pinus taeda*, entre otras, se pueden clasificar como especies "muy variables", mientras que especies como *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y *P. patula* califican como especies "poco variables". Sin embargo, no se debe olvidar que diferencias aparentemente pequeñas en altura, diámetro y sobrevivencia representan grandes diferencias en volumen total producido por hectárea. En Costa Rica se ha encontrado para varias especies tropicales, que la superioridad en producción de volumen total entre la mejor procedencia y el promedio de todas las procedencias evaluadas es generalmente mayor del 75% y puede alcanzar en algunos casos más del 200% (Corea, 1992).

Sin embargo, es importante señalar que no es conveniente menospreciar diferencias aparentemente pequeñas (grupo 2 y 3) en altura, diámetro y sobrevivencia ya que pueden representar en suma grandes diferencias en volumen total producido por hectárea.

Por otra parte, permanece la interrogante de si las diferencias que se presentan en los ensayos se repetirán en plantaciones a gran escala. La extrapolación de los resultados de ensayos a plantaciones comerciales depende de varios factores:

1. La disponibilidad de semilla de la misma fuente que la procedencia (o procedencias) que probó su superioridad en los ensayos. Es inevitable que exista alguna variación entre la recolección de pequeñas cantidades de semilla para investigación provenientes de una muestra de pocos (25-100) árboles y la recolección "comercial" de grandes cantidades de un mayor número de árboles dispersos en una área más amplia. En algunos casos, la recolección "comercial" puede presentar una ventaja para las siguientes generaciones si la mezcla de semillas de una área mayor reduce el grado de endogamia en las generaciones posteriores. Este efecto pueden contribuir a mejorar el comportamiento de "razas locales" derivadas de la procedencia original, en comparación con el que se obtiene cuando se usa semilla directamente de la procedencia original, tal como se ha informado en varios ensayos. Sin embargo, es muy importante que la recolección "comercial" se efectúe en la misma área semillera que la recolección original (la misma o similar latitud, altitud, precipitación, exposición, suelo, etc.).

2. Qué tanto de la aparente superioridad fenotípica expresada en los ensayos se deba a superioridad genética (qué se repetirá en otras plantaciones), o a superioridad ambiental (que no se pueden repetir). Los experimentos bien diseñados permiten estimar qué proporción de las diferencias fenotípicas se atribuyen a diferencias genéticas (i.e. la heredabilidad,  $h^2$ , de las diferencias observadas). En las series de ensayos de teca y melina (Keiding, *et al.*, 1986; Lauridsen *et al.*, 1987) se calculó " $h^2$ " en cada experimento para la media del diámetro y se encontró que por lo general se encuentra entre 0,5 y 0,9. El producto de " $h^2$ " multiplicado por las diferencias fenotípicas se usan para estimar las diferencias genéticas (Anexo 1).

Un ejemplo particular de como los factores ambientales pueden afectar las diferencias reales en los ensayos es el efecto de borde entre parcelas pequeñas (en líneas o árbol único). Los árboles de las mejores procedencias pueden crecer al lado de árboles de procedencias inferiores y ser sometidos a menor competencia que cuando crecen en plantaciones puras junto a árboles de la misma procedencia. El efecto de borde puede aumentar con la edad del ensayo y afectar en mayor proporción al diámetro y el volumen que a la altura. En alguna medida, este problema particular es un defecto del diseño experimental ya que existe dependencia entre tratamientos. Este problema se puede reducir sustancialmente por el uso de parcelas grandes rectangulares o cuadradas con una o dos líneas de borde, que no se miden, de la misma procedencia.

3. La correlación entre las diferencias en altura en el ensayo y las diferencias en las plantaciones operacionales a la edad de rotación (correlaciones juvenil-maduro). Si los ensayos se miden a la edad de rotación, la correlación es 1. Sin embargo, en la mayoría de los casos es necesario seleccionar el material a plantar cuando los ensayos son todavía relativamente jóvenes. Lambeth (1980) evaluó la correlación entre altura juvenil y altura madura para varias especies de coníferas a diferentes edades y encontró que ésta crece de 0,5, cuando la edad de evaluación es un 20% del turno, a 0,8, cuando la edad de evaluación es un 50% de la rotación. Se puede llegar a un posible balance entre hacer una selección prematura que puede ser riesgosa y esperar demasiado tiempo hasta el turno. En este sentido se pueden dar los siguientes consejos:
  - a. Base la decisión sobre una evaluación hecha a una edad mínima de un tercio de la edad de rotación o al menos cuatro años aproximadamente para especies con rotaciones cortas. La evaluación a una edad de 33% del turno da una correlación esperada de 0,7 en los estudios de Lambeth, pero su aplicación a especies tropicales todavía debe ser comprobada.
  - b. Si es posible, se debe corroborar que exista estabilidad en la posición que ocupan las procedencias en las dos últimas evaluaciones, especialmente las procedencias más sobresalientes.

- c. Como se recomendó anteriormente, seleccionar material de las mejores procedencias y no sólo de la más sobresaliente, y establezca rodales semilleros de ellas con área suficiente para prevenir las necesidades futuras. Si es necesario se pueden hacer algunas modificaciones en la selección antes de que se recolecte la primera semilla para plantaciones comerciales. Mientras crecen los rodales semilleros se puede corroborar si las procedencias inicialmente promisorias mantienen su superioridad y rechazar alguna que haya modificado negativamente su comportamiento.
4. La conversión de las diferencias en altura a las diferencias en productividad total en la edad de rotación. La revisión de las tablas de crecimiento para diferentes clases de calidad de sitio (a los cuales las procedencias estables se pueden considerar análogas) sugiere que diferencias de un 10% en altura a la edad madura entre clases de sitio adyacentes se asocian con diferencias en producción de volumen de 15-20%. Si se consideran las clases diamétricas superiores, existe un incremento adicional en la diferencia en la producción de volumen.
5. La correlación entre la productividad esperada a la edad de rotación de las mejores procedencias en los ensayos y la productividad cuando se planta en áreas extensas. Esto depende de cuan representativos son los sitios de los ensayos del área total de plantación. Por ejemplo, los resultados de un ensayo plantado en un suelo arcilloso mal drenado tienen poco valor si posteriormente se descubre que un 80% del área de plantación tiene un suelo arenoso bien drenado.

La eficiencia con que los sitios experimentales representen la variabilidad ambiental existente en el área de plantación, depende de la eficiencia de los estudios preliminares que se hagan sobre la variación edáfica y topográfica. A menudo estos estudios revelan la existencia de varios tipos de sitios en el área de plantación. El comportamiento de las procedencias debe ser evaluado en cada uno de los tipos de sitio independientemente. Nunca se puede justificar la extrapolación de los resultados de un ensayo a otro sitio o clima contrastante, sin evaluación adicional. Sin embargo, se pueden esperar correlaciones satisfactorias entre varios sitios dentro de una zona de plantación razonablemente homogénea. Por ejemplo, Wellendorf (1986) encontró una correlación de 0,8 para una especie en Suecia dentro de una zona de plantación representativa.

Para la mayoría de las especies tropicales no se han estudiado todos los aspectos mencionados anteriormente. En el caso de que no se cuente con información, es preferible usar estimaciones conservadoras del grado de mejoramiento (ganancia genética) que se puede obtener de los programas de investigación sobre procedencias. Por ejemplo, algunas estimaciones conservadoras arbitrarias del porcentaje de superioridad promedio de las tres procedencias con mayor crecimiento sobre la media de todas las procedencias son:

1. Especies "muy variables": 10-20%.
2. Especies "moderadamente variables": 5-10%.
3. Especies "poco variables": 1-5%.

La discusión anteriormente presentada se refiere sólo a la cantidad y tamaño de trozas producidas. También es posible mejorar la calidad del fuste (rectitud, bifurcaciones, circularidad, tamaño de los nudos, etc.) y de la madera (gravedad específica, longitud de fibra, etc). En ocasiones, las variables de crecimiento y vigor pueden estar correlacionadas inversamente con las de calidad del fuste y la madera. Por lo tanto, es prudente no agregar ganancias por el mejoramiento de estas variables en la estimaciones iniciales. En algunas especies, sin embargo, el aumento de las ganancias puede depender del mejoramiento de las características de calidad en vez del crecimiento. Por ejemplo, la selección de las procedencias que presentan mayor rectitud del fuste puede producir un mayor aumento en el valor final de la cosecha que la selección de las procedencias de mayor producción de volumen bruto.

Aunque rara vez la misma procedencia es la mejor en todos los sitios, algunos ensayos internacionales han identificado ciertas procedencias que consistentemente se encuentran entre las primeras en un rango amplio de condiciones de sitio. La procedencia Albacutya de *Eucalyptus camaldulensis* ha sido la de mejor comportamiento en la región mediterránea, mientras que Petford y Katherine han sido consistentemente las mejores en las regiones tropicales semihúmedas (estacionales) y secas, respectivamente (Lacaze, 1978). Otro ejemplo se presenta con las procedencias Guanaja, Alamicamba y Santa Clara de *P. caribaea* var. *hondurensis* (Gibson, Barnes y Berrington, 1983). Por otra parte, la procedencia Yucul, Nicaragua de *Pinus tecunumanii* que ocupa el primer lugar en producción de volumen en la gran mayoría de los ensayos internacionales de procedencias de pinos centroamericanos, coordinados por el Instituto Forestal de Oxford (Greaves, 1980).

La procedencia Mountain Pine Ridge (MPR) de Belice fue la fuente de semilla más usada en las plantaciones iniciales de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. En recientes ensayos internacionales de procedencias con esta especie, esta fuente tuvo generalmente un comportamiento cercano al promedio de todas las procedencias en estudio (Gibson, Barnes y Berrington, 1983). Tal como se muestra en el Anexo 1, en varios ensayos la mejor procedencia produce 20% más volumen (y en ocasiones hasta 30% más) que la procedencia no mejorada de MPR.

Por otra parte, las razas locales manejadas o las procedencias locales algunas veces figuran entre las mejores procedencias evaluadas. La semilla del huerto de clones de *P. caribaea* var. *hondurensis* establecido en Byfield, Australia, derivado de la procedencia Mountain Pine Ridge (MPR), Belice, produjo en promedio 12% más volumen que la fuente MPR no mejorada. En varios sitios el mejoramiento fue de 20%. Las razas locales y los huertos semilleros produjeron aún más volumen que la mejor nueva introducción no mejorada en el caso de *Eucalyptus cloeziana* en Costa de Marfil, *Pinus patula* en Zimbabwe y *P. taeda* en Malawi, *Tectona grandis* en

Nigeria y Papua Nueva Guinea, *Bombacopsis quinata*, *E. tereticornis*, *E. grandis*, *P. patula*, *Cupressus lusitanica* en Colombia y *Gmelina arborea* en Costa Rica. Niveles de mejoramiento similares se han obtenido a través de la selección y manejo de plantaciones de fuentes nativas de *Tectona grandis* en India y Tailandia. Aunque varios de los ensayos de procedencias incidentalmente han demostrado el valor de las razas locales, esta situación no cambia el hecho de que las mayores ganancias a largo plazo se obtienen identificando, a través de ensayos bien diseñados, las procedencias mejor adaptadas y de mejor comportamiento en las condiciones locales y seleccionando, propagando y cruzando posteriormente los mejores genotipos de esas procedencias.

#### 4. SELECCION DENTRO DE PROCEDENCIAS

Los resultados de la investigación han demostrado que, en muchas especies, existe también una considerable variación genética entre individuos dentro de poblaciones o procedencias. Después de que se han identificado una o más procedencias con un comportamiento superior en las condiciones ambientales locales, se puede continuar seleccionando rodales o plantaciones superiores dentro de esas procedencias para manejarlos y convertirlos en rodales semilleros y/o seleccionando árboles superiores para establecer huertos semilleros clonales o de plántulas, en donde se concentre el material genético de los individuos seleccionados.

Con la selección y manejo de rodales semilleros se obtiene alguna ganancia genética. Esto implica la realización de raleos fuertes y tempranos, en los cuales se eliminan los fenotipos inferiores y se promueve el desarrollo de las copas de los mejores árboles, estimulando así una buena producción de semilla. La intensidad de selección en rodales semilleros es aproximadamente de 1:10 con respecto a la densidad inicial de plantación y de 1:4 a 1:5 con respecto a rodales comerciales manejados de la misma edad. Estos valores son pequeños si se comparan con la intensidad de 1:1000 que frecuentemente se usa en la selección de árboles plus utilizados para establecer huertos semilleros. Cuando el área requerida para un rodal semillero es sólo una pequeña proporción del área total de plantación, la selección del rodal en sí misma podría producir algún grado de mejoramiento genético adicional, siempre y cuando exista, por cualquier motivo, alguna variación genética entre los rodales candidatos y esta se manifieste en diferencias fenotípicas observables. La selección, por ejemplo, de las mejores 20 ha de un total de 1000 ha es significativamente mejor que la selección de 20 ha de un total de 50 ha. Sin embargo, el mejoramiento que se logra por la selección y manejo de rodales semilleros probablemente no sea mayor del 25%-50% del que se logra inicialmente con un huerto semillero. La principal ventaja de los rodales semilleros radica en su simplicidad y bajo costo y en la posibilidad de cosechar semilla mejorada en pocos años una vez aplicado el tratamiento.



La mayor parte de la evidencia sobre el mejoramiento genético que se obtiene en huertos semilleros proviene de las zonas templadas. Existe mucho menos información sobre coníferas y especies latifoliadas tropicales. Aún en el caso de las coníferas de zonas templadas, la mayoría de las comparaciones entre el material mejorado y las fuentes comerciales comúnmente utilizadas se han realizado a edades iguales o inferiores a la mitad de la edad de rotación. Aún así, la evidencia disponible es bastante consistente. Carlisle y Teich (1978) la han resumido de la siguiente manera: "En la mayoría de las especies se puede esperar por lo menos un 10% de ganancia en crecimiento y en algunas hasta 15-25%". Se pueden obtener ganancias adicionales en la calidad del fuste y de la madera, así como en la resistencia a plagas y enfermedades. El cuadro resumen de ganancias en crecimiento preparado por Nikles (1970) en varias especies de coníferas a edades de 6 a 15 años, confirma la anterior estimación. Las ganancias en volumen varían desde 10% para selección fenotípica con polinización por viento hasta 20% para selección basada en pruebas de progenie, combinada con polinización controlada. Eldridge (1982) encontró que la semilla de un huerto no raleado de *Pinus caribaea*, fenotípicamente seleccionado, establecido en Australia, produjo un promedio de cerca del 15% mayor en incremento en volumen por hectárea a la edad de 10-12 años que la fuente de semilla comercial estándar. También se duplicó el porcentaje de árboles sobresalientes en el rodal. Hollowell y Porterfield (1986) sugirieron una ganancia en volumen a la edad de rotación de 8-15% en *Pinus taeda*, con un solo ciclo de selección y un aclareo del 30-55% en el huerto semillero. También sería posible obtener una ganancia adicional del 5% para gravedad específica y calidad del fuste (Porterfield, 1974). Para la misma especie en Texas, van Buijtenen y Saitta (1972) estimaron una ganancia en volumen de 15% más un 15% adicional por forma del fuste, forma de la copa y gravedad específica, producto de un ciclo de selección y producción de semilla en un huerto semillero no aclareado establecido por injertos. También predijeron una ganancia adicional de 25% como consecuencia de la prueba de progenies y del establecimiento de un huerto semillero de segunda generación. En *Pinus elliotii*, una especie menos variable, la ganancia en la producción de volumen total a los 20 años (incorporando los beneficios de la resistencia al herrumbre y el aumento en crecimiento), estimada en un estudio sobre huertos semilleros en el sureste de los Estados Unidos, fue de 7% para huertos no raleados y 13,2% después del raleo (Universidad de Florida, 1988). En el caso de *P. radiata* de un huerto semillero clonal establecido con clones seleccionados a una tasa de 1:1000 en Nueva Zelanda, Shelbourne (1969) predijo que el porcentaje de ganancia en rectitud excedería el del diámetro; las ganancias fueron estimadas en 11% para el diámetro y 47% para rectitud. En el Reino Unido, se ha reportado para el primer ciclo de selección una ganancia en altura de 15% en *P. palustris* a la edad de 10 años y de 18% en *Picea sitchensis* a la edad de 6 años (Forestry Commission, 1985 a y b). La ganancia de los siguientes ciclos de selección varió entre 5 y 30%, dependiendo del grado de control de la polinización, evaluación de la progenie, reelección de familia y aclareo de huertos.

El género *Populus* es un buen ejemplo del uso de propagación vegetativa en mejoramiento forestal. En Italia, el mejoramiento en este género para resistencia al hongo *Marssonina brunnea* es uno de los objetivos más importante del mejoramiento. El conocido clon I 214 produjo como promedio anual un 32% más de dinero (sin descuento) que el clon I 488 en áreas sin *Marssonina*, aumentando dramáticamente este valor a 367% cuando el hongo está presente y no se trata químicamente (Castellani y Prevosto, 1970). En contraste, la superioridad del clon I 214 con respecto al clon "Canadian" fue relativamente constante (56-60%), independientemente de la presencia o ausencia de *Marssonina*.

La información sobre el efecto de la selección individual en especies tropicales y subtropicales se encuentra dispersa. El efecto de la selección natural, silvicultural y genética sobre el desarrollo de razas locales se trató en la sección previa en relación con los resultados de ensayos de procedencias de *Eucalyptus cloeziana*, *P. patula*, *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. taeda* y *Tectona grandis*. La selección deliberada de árboles individuales superiores en poblaciones introducidas puede producir un mejoramiento adicional significativo. En este sentido se han reportado las siguientes ganancias:

Especie	Referencia	Detalles	Ensayo y Edad	Mejoramiento
<i>Eucalyptus grandis</i>	Wallenberg 1984	"Nuevo Sistema" = plantación a escala comercial de estacas enraizadas de 31 árboles élite seleccionados de 36.000 ha combinado con métodos intensivos de establecimiento, comparado el "Viejo Sistema" = uso de plántulas de semillas de plantaciones comerciales, con métodos de establecimiento menos intensivos	Prod. Vol/ha, 7 años	112%
			Rendimiento en pulpa/unidad de volumen	23%
			Total	135%
<i>Eucalyptus grandis</i>	van Wyk 1985	72 familias (fratria completos), incluyendo 18 hembras y 19 machos como progenitores, comparados con testigos comerciales: Media de las 72 familias Media de las mejores 10 familias Media de la mejor familia	Volumen/árbol 9 años	
			9 años	47%
			9 años	76%
			9 años	132%
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Beilly y Nikles 1978	Mejoramiento "mínimo" con huertos semilleros clonales no aclareados, comparados con el testigo comercial Ditto, posiblemente mejorado	Area basal/ha 8 años	10%
			Area basal/ha 8 años	10%
			Altura dominante 25 años	1m

Especie	Referencia	Detalles	Ensayo y Edad	Mejoramiento
<i>Pinus patula</i>	Barnes 1978	Media de policruce de 24 familias de árboles plus, comparada con testigos comerciales.	Volumen/árbol 5 años,	17%
			Volumen/árbol 8 años	32%
			Rectitud de fuste 8 años,	8%
			Tamaño de ramas 5 años,	13%
		Huerto de segunda generación, incluyendo los mejores individuos de las "mejores" familias (mejoramiento total)		
		Retención 50% de las mejores familias	Volumen/árbol 5 años	38%
		Retención 25% de las mejores familias		50%
<i>Pinus elliotii</i>	Barnes 1978	Media de 6 cruces (fratrias) de arboles plus, comparada una procedencia introducción recientemente de Louisiana	Volumen/árbol 7 años	107%
			Rectitud del fuste	4%
<i>Pinus taeda</i>	Barnes 1978	Media de 4 cruces (fratrias) de arboles plus, comparada una procedencia introducida recientemente de Louisiana	Volumen/árbol 7 años	535%
			Rectitud del fuste	13%

En el caso de porcentajes de mejoramiento muy altos, es difícil distinguir entre el efecto de la selección individual y otros efectos. Con *Eucalyptus grandis* en Brasil, una parte significativa del mejoramiento en la producción de pulpa se puede asumir como consecuencia de la intensificación de las técnicas de establecimiento. En este caso, además, las rotaciones relativamente cortas (7 años) y el éxito en la propagación vegetativa de esta especie han ayudado a obtener rápidos progresos. Es interesante que Shelbourne (1969), comparando diferentes estrategias de mejoramiento para *Pinus radiata*, estimó que la selección de árboles plus y la propagación vegetativa a escala comercial de solamente los mejores árboles (genotipos), si fuera posible, daría las mayores ganancias en el menor tiempo.

En los ejemplos de *P. elliotii* y *P. taeda* citado por Barnes (1978), los árboles plus fueron seleccionados en la bien adaptada raza local de Zimbabwe, mientras que los lotes de control fueron introducidos de Louisiana, Estados Unidos. Parte de las diferencias se pueden atribuir entonces al efecto de procedencias: la diferencia entre una raza local adaptada y mejorada y una procedencia exótica posiblemente mal adaptada. Además, los cruces controlados (fratrias completos) son más típicos de una etapa más avanzada y sofisticada de un programa de mejoramiento que de la primera fase de selección individual en procedencias adecuadas.

Para los propósitos de la presente nota, se da mayor énfasis a las ganancias esperadas en etapas iniciales de selección individual, esto es, selección fenotípica de

árboles plus dentro de una población dada a una intensidad de cerca de un árbol en mil (aproximadamente 3 desviaciones estándar de la media de la población) y la concentración de los genotipos fenotípicamente superiores en un huerto semillero injertado o en un huerto semillero de plántulas establecido a través de la recolección de semilla de polinización abierta de dichos árboles superiores. A partir de estos procedimientos relativamente simples se puede esperar que los mejoramientos para el valor de la producción total de biomasa en plantaciones a gran escala (considerando los puntos 1-5 de la sección 2) sean de las magnitudes siguientes:

1. Procedencias con variación "alta" : 15-30%.
2. Procedencias con variación "moderada" : 5-15%.
3. Procedencias con variación "baja" : 1-5%.

Mejoramientos adicionales se pueden obtener en aspectos tales como la calidad de la madera, rectitud del fuste, resistencia a plagas y vientos, etc. Plumptre y Barnes (1982), estimaron que, en teoría, el mejoramiento en características de calidad en pinos tropicales pueden ser por lo menos tan grande como en volumen. Sin embargo, debido a una posible correlación negativa entre las características deseables ellos adoptaron un nivel de mejoramiento conservador, equiparando la ganancia en valor total con la mitad de la ganancia teórica de volumen + calidad. En algunas especies, como *Pinus kesiya* y otras con problemas de forma, la ganancia por selección individual en producción de volumen puede ser baja, pero se compensa con las ganancias sustanciales que se pueden obtener en calidad, especialmente en rectitud del fuste. El valor del mejoramiento puede ser entonces tan grande como en otras especies que naturalmente tienen excelente forma (*Eucalyptus grandis*, *Vochysia guatemalensis*, *Araucaria spp.*, etc), en las cuales el mayor efecto de la selección ocurre en el volumen.

Es importante que los métodos de evaluación de la características de calidad, como rectitud del fuste, se relacionen estrechamente con los valores de utilización (Barnes y Gibson, 1986). En algunos países es difícil realizar una evaluación realista debido a que el mercado no reconoce suficientemente la importancia de la calidad del fuste y de la madera, fijando precios diferenciales adecuados a la calidad de la troza. Donde existen sistemas de precios de la madera bien desarrollados, es posible adaptar las escalas de evaluación de calidad para lograr los criterios adecuados. Para los varios tipos de especies se pueden necesitar diferentes escalas. En Dinamarca, por ejemplo, existe un gradiente marcado de precios para latifoliadas y otro relativamente menos fuerte para coníferas. La relación entre la primera y la tercera clase de precios es 3,3 en *Quercus*, 2,3 en *Fagus* y 1,2 en coníferas (Skoven Ny, 1986).

Davis (1970) señaló que los costos de aprovechamiento en el sureste de los Estados Unidos constituyen el 60-70% del costo total de la madera puesta en el aserradero. Por tanto, cualquier aumento porcentual en la eficiencia del

aprovechamiento puede ser 2-3 veces más efectivo en aumentar la rentabilidad, que el mismo aumento en la producción de volumen de trozas. La rectitud del fuste afecta de forma importante la eficiencia del aprovechamiento. Davis también calculó que un aumento porcentual relativamente pequeño en la eficiencia de aserrío (5% de reducción en el tiempo de aserrío más 5% de aumento en la tasa de conversión) incrementaría las utilidades del aserradero en un 15-41%. Nuevamente, la forma de la troza y la calidad de la madera ejercen una gran influencia y es probable que el efecto de ambas características hayan sido hasta ahora subestimado cuando se consideran los beneficios del mejoramiento genético forestal.

## 5. RESUMEN DE LAS GANANCIAS ESPERADAS EN LAS PRIMERAS ETAPAS DEL MEJORAMIENTO FORESTAL

En resumen, el aumento en el valor total de la cosecha en una rotación debido a la aplicación de mejoramiento genético forestal en el trópico, no debería, en promedio, ser menor que en las zonas templadas. Las ganancias genéticas que se puede obtener en las primeras etapas (selección entre procedencias seguida por el primer ciclo de selección individual y la producción de semilla en huertos semilleros no raleados), se pueden estimar conservadoramente como sigue:

Grado de variación entre procedencias	Ganancia esperada de la selección de procedencias (%)	Grado de variación dentro de procedencias	Ganancia esperada de la selección individual * (%)	Ganancia total esperada (%)
Alto	10-20	Alto	15-30	25-50
	10-20	moderado	5-15	15-35
	10-20	bajo	1-5	11-25
Moderado	5-10	Alto	15-30	20-40
	5-10	moderado	5-15	10-25
	5-10	bajo	1-5	6-15
Bajo	1-5	Alto	15-30	16-35
	1-5	moderado	5-15	6-20
	1-5	bajo	1-5	2-10

\* Huerto semillero no genéticamente raleado

Es probable que las ganancias que se obtengan en las fases posteriores de mejoramiento (pruebas de progenie, polinización controlada, propagación vegetativa etc) sean del mismo orden de magnitud que las esperadas en la primera fase de selección dentro de procedencias. Sin embargo, dichas ganancias están fuera del alcance de esta nota.

## 6. ASPECTOS ECONOMICOS

Las ganancias genéticas discutidas anteriormente se deben considerar en conjunto con los costos incurridos en la investigación y el desarrollo necesarios para obtenerlas. El método de la tasa interna de retorno (TIR) o rendimiento financiero, ha sido uno de los más usados en el análisis económico de programas de mejoramiento. Este método consiste en estimar la tasa de interés en la que los ingresos totales igualan los costos totales, descontados todos a un mismo instante en el tiempo.

Recientemente Stier (1986) resumió los resultados de varios estudios económicos sobre la selección de árboles y el establecimiento y manejo de huertos semilleros. La mayoría de los estudios se realizaron en Norte América y la TIR varió entre el 6 y 20%, con excepción de un caso. La excepción se dio en un programa de *Picea abies*, en el cual la TIR estuvo entre 2,3% y 6,9% (Carlisle y Teich, 1971). En especies de crecimiento lento en climas fríos o templado-fríos, la tendencia fue a obtener TIRs menores de 10% (*Picea glauca*, *Pinus resinosa*). En climas templado-cálidos a subtropicales, donde ocurren mejores crecimientos, la TIR tendió a ser superior al 15% (*P. taeda*, *P. elliotii*). Como regla general, cuando se evalúan proyectos a nivel económico nacional, la TIR se puede considerar satisfactoria si es mayor de 8% y altamente satisfactoria cuando supera el 12%.

Existe poca información sobre los costos y beneficios económicos del mejoramiento de especies tropicales, incluyendo la selección de procedencias. En el Anexo 2 se muestra un intento por evaluar la investigación en procedencias en el caso hipotético de un pino tropical, tal como *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Para los supuestos y condiciones del caso de estudio, la TIR varió de 9,7% a 15,2% con un mejoramiento del 2,5% y 20%, respectivamente.

Reilly y Nikles (1978) analizaron los costos y beneficios de un huerto semillero clonal no raleado de *P. caribaea* en Queensland. Ellos se basaron en los costos reales del Huerto Semillero Kennedy, incluyendo costos de operación:

- Año 1: Inicio de la selección de árboles plus
- Año 4: Injertación de la sección 1 del huerto semillero
- Año 10: Primera recolección de semilla del huerto

Es probable que las ganancias que se obtengan en las fases posteriores de mejoramiento (pruebas de progenie, polinización controlada, propagación vegetativa etc) sean del mismo orden de magnitud que las esperadas en la primera fase de selección dentro de procedencias. Sin embargo, dichas ganancias están fuera del alcance de esta nota.

## 6. ASPECTOS ECONOMICOS

Las ganancias genéticas discutidas anteriormente se deben considerar en conjunto con los costos incurridos en la investigación y el desarrollo necesarios para obtenerlas. El método de la tasa interna de retorno (TIR) o rendimiento financiero, ha sido uno de los más usados en el análisis económico de programas de mejoramiento. Este método consiste en estimar la tasa de interés en la que los ingresos totales igualan los costos totales, descontados todos a un mismo instante en el tiempo.

Recientemente Stier (1986) resumió los resultados de varios estudios económicos sobre la selección de árboles y el establecimiento y manejo de huertos semilleros. La mayoría de los estudios se realizaron en Norte América y la TIR varió entre el 6 y 20%, con excepción de un caso. La excepción se dio en un programa de *Picea abies*, en el cual la TIR estuvo entre 2,3% y 6,9% (Carlisle y Teich, 1971). En especies de crecimiento lento en climas fríos o templado-fríos, la tendencia fue a obtener TIRs menores de 10% (*Picea glauca*, *Pinus resinosa*). En climas templado-cálidos a subtropicales, donde ocurren mejores crecimientos, la TIR tendió a ser superior al 15% (*P. taeda*, *P. elliotii*). Como regla general, cuando se evalúan proyectos a nivel económico nacional, la TIR se puede considerar satisfactoria si es mayor de 8% y altamente satisfactoria cuando supera el 12%.

Existe poca información sobre los costos y beneficios económicos del mejoramiento de especies tropicales, incluyendo la selección de procedencias. En el Anexo 2 se muestra un intento por evaluar la investigación en procedencias en el caso hipotético de un pino tropical, tal como *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Para los supuestos y condiciones del caso de estudio, la TIR varió de 9,7% a 15,2% con un mejoramiento del 2,5% y 20%, respectivamente.

Reilly y Nikles (1978) analizaron los costos y beneficios de un huerto semillero clonal no raleado de *P. caribaea* en Queensland. Ellos se basaron en los costos reales del Huerto Semillero Kennedy, incluyendo costos de operación:

- Año 1: Inicio de la selección de árboles plus
- Año 4: Injertación de la sección 1 del huerto semillero
- Año 10: Primera recolección de semilla del huerto

- Año 10-22: Recolección anual de semilla del huerto
- Año 22: Cesa la recolección de semilla, se libera el crecimiento del huerto para producir madera.
- Año 11-23: Plantación anual de material mejorado, un año después de cada recolección.
- Año 46-58: Aprovechamiento anual de la cosecha mejorada después de una rotación de 35 años.

Se estimó que una hectárea de huerto produce una cosecha promedio anual de 28 kg de semilla, suficiente para plantar unas 380 ha. También se consideraron cuatro diferentes posibilidades de mejoramiento del valor de la cosecha y se estimó la TIR para cada uno de ellos, tal como sigue:

El hecho de que la TIR en C. (mejora en área basal y rectitud) sea sólo un poco mejor que en A (solamente mejora en área basal) se podría deber a alguna posible correlación negativa entre área basal y rectitud. Este fenómeno no se debe asumir como cierto automáticamente y se debe verificar en cada caso.

Posibilidades de mejoramiento	Ganancia sobre testigos comerciales (%)	TIR (%)
A. <u>Mínimo</u> = 10% de incremento en área basal/ha a 8 años de edad (estimado conservador basado en resultados de ensayos de progenie)	10,4%	13,9
B. <u>Probable</u> = 10% de incremento en área basal/ha a 8 años de edad más un incremento de 1 m en la altura dominante a los 25 años.	10,7%	15,2
C. <u>10%</u> de incremento en área basal/ha a 8 años de edad más mejoramiento en la rectitud: 1% mejor en los primeros tres raleos y un 2% en el cuarto raleo y la cosecha final.	?	14,6
D. <u>Sin</u> mejoramiento en área basal. Mejoramiento en rectitud como en C.	?	9,9



Las tasas de retorno anteriores corresponden a la producción de semilla de huertos no aclareados genéticamente. Los autores encontraron que, para una tasa de descuento del 8% la selección inicial de árboles plus significa un 36% del costo descontado de mejoramiento, el establecimiento del huerto semillero un 30% y el mantenimiento del mismo un 34%. Aunque los costos de establecimiento y mantenimiento de huertos semilleros son proporcionales al área del huerto necesaria para producir la semilla mejorada requerida y, por tanto, al área total de plantación anual, los costos de búsqueda y selección de árboles plus son bastante independientes del área a plantar. Esto conlleva al hecho importante de que la rentabilidad de un programa de mejora forestal depende no solo del porcentaje de incremento en el valor de la cosecha sino también de la escala de plantación (área a plantar). En el siguiente ejemplo hipotético se asume la misma proporción de costos (36%-30%-34%) como en el anterior ejemplo de Queensland:

AREA DE PLANTACION ANUAL (ha)	10.000	1.000	100
<b>COSTO DESCONTADO TOTAL (\$)</b>			
Selección de árboles plus	18.000	18.000	18.000
Establ. huerto semillero	150.000	15.000	1.500
Manejo huerto semillero	170.000	17.000	1.700
Costo total operaciones de mejoramiento	338.000	50.000	21.200
<b>COSTO DESCONTADO/ha (\$)</b>			
Selección de árboles plus	1,8	18	180
Estab. huerto semillero	15	15	15
Manejo huerto semillero	17	17	17
Costo total/ha operaciones de mejoramiento	33,8	50	212
<b>INGRESOS DESCONTADOS/ha (\$)</b> (ingresos adicionales producto del mejoramiento genético)	100	100	100
<b>GANANCIA O PERDIDA/ha DESCONTADA (\$)</b>	66,2	50	(112)
<b>GANANCIA O PERDIDA TOTAL DESCONTADA (\$) DEL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO</b>	662.000	50.000	(11.200)

Se puede ver que la fuerte inversión inicial que genera la selección de árboles plus sólo se justifica si la tasa anual de plantación es considerable. Los programas de plantación muy pequeños no pueden realizar sus propios programas de mejoramiento en forma rentable. Sus acciones deben estar orientadas hacia la compra de pequeñas cantidades de semilla mejorada de programas de mejoramiento de otros proyectos mayores de los servicios nacionales forestales, cooperativas o grandes compañías privadas. Como requisito se debe conocer el grado de mejoramiento esperado (intensidad de selección, resultados de ensayos de progenie, etc.) y del grado de adaptación (correspondencia ambiental) de las poblaciones en las que se realizó la selección con respecto al área de plantación en cuestión. Puesto que el costo de la semilla es sólo una pequeña parte del costo total de plantación, cualquier incremento modesto en la productividad justifica el pago de un precio mucho mayor por la semilla mejorada. Reilly y Nikles (1978) estimaron para *Pinus caribaea*, que con el incremento en rendimiento descrito antes y una tasa de interés de 8%, los compradores de semilla pueden permitirse pagar por semilla mejorada cerca de cuatro veces el precio que pagan por semilla no mejorada. Davis (1967) encontró que un pequeño aumento del 2,5 al 4% en la producción en plantaciones de *P. taeda* justifica pagar por semilla mejorada de 2 a 3 veces el precio de la semilla comercial. Barner (1986), citando cálculos de P.H. Andersen, menciona un caso de *Picea abies* en Dinamarca, donde con un mejoramiento del 10 al 15% y una tasa de descuento del 5%, si un empresario se decidiera invertir todo el incremento del valor actual neto (VAN) en semilla mejorada, podría permitirse pagar por ésta, hasta 20 veces el precio de la semilla comercial no mejorada.

El mejoramiento genético que se obtiene en la primera etapa de un huerto semillero se puede aumentar a través de la realización de raleos genéticos. Esto se logra con la eliminación de los clones o familias que han demostrado inferioridad genética en las pruebas de progenie. Varios autores han presentado evidencia de que un raleo genético de alta intensidad (remoción del 50-70% de los peores clones o familias) puede aumentar en un 50% la ganancia genética con respecto al huerto no raleado. Esta ganancia adicional tiene que ser cotejada con los costos adicionales debidos a la realización de las pruebas de progenie y de los raleos, así como con la reducción temporal en la cantidad de semilla producida por el huerto. En este sentido y dependiendo de la situación, podría ser preferible producir 100 kg/año de semilla con una ganancia genética del 10% que producir 50 kg/año con una ganancia de 15%. Por este motivo, van Buijtenen y Saitta (1972) concluyeron que, en las condiciones locales de los huertos semilleros de *P. taeda*, el raleo genético tiene un valor dudoso. Sin embargo, las pruebas de progenie continúan siendo esenciales para la selección de los clones o familias que formarán el huerto semillero de segunda generación. En otras especies, con una selección cuidadosa del distanciamiento inicial y del tiempo del raleo, puede ser que la operación se pague por sí misma.

Los ejemplos anteriores sugieren que, para un pino tropical como *Pinus caribaea*, la selección de árboles plus y su correspondiente establecimiento y manejo en un huerto semillero debe rendir una TIR de 12-15%.

Algunos autores han evaluado los proyectos de mejoramiento forestal no en términos de la TIR sino del Valor Actual Neto (VAN) o Renta Neta Descontada. Para aplicar este método se asume una tasa de interés realista (generalmente la "Tasa Real" basada en la tasa nominal menos la inflación). El VAN representa el valor total de los ingresos menos el valor total de los egresos, todos descontados a tiempo presente, usualmente al inicio del proyecto. En general, el VAN es en la actualidad el método preferido.

Carlisle y Teich (1971), calcularon que el trabajo de mejoramiento en *Picea glauca* en Canadá debe rendir un incremento en la renta descontada de US\$ 832.000, comparado con un gasto anual de US\$ 123.000. Se asumió una tasa de interés del 6%, un valor de mejoramiento de 15%, suelos moderadamente fértiles y un programa de plantación de 40.000 ha anuales.

En el Anexo 2, el caso promedio, 6% de interés y 10% de mejoramiento, muestra un VAN de US\$ 594.000 al año 58, con un programa de plantación de 1000 ha anuales. En este caso particular, los costos totales descontados se recuperan en el tercer año de cosecha (año 45 del proyecto), los excedentes de los años posteriores serán entonces utilidad.

Todos los cálculos mostrados en el Anexo 2 se refieren a la rentabilidad al final de la primera rotación comercial. En la práctica, las procedencias superiores se continúan usando en las rotaciones subsecuentes, aún y cuando no se hagan inversiones adicionales en mejoramiento. Los beneficios adicionales recibidos en las rotaciones subsecuentes se pueden estimar calculando el "multiplicador infinito", el cual se puede aplicar al VAN de la primera rotación, asumiendo que el mejoramiento de esta se mantiene a perpetuidad en todas las subsiguientes rotaciones. Para una tasa de interés del 6% y una rotación de 16 años, el "multiplicador infinito" es de 1,65 y el VAN al infinito es de \$ 594,000 x 1,65 = \$ 980.000.

Las Figuras 1-3 ilustran, para una sola rotación, las relaciones entre el valor porcentual de la ganancia, varias tasas de interés, el TIR, el VAN y la relación costo/beneficio. La Figura 2 muestra las relaciones del valor actual neto y la línea "equilibrio", en la cual la relación beneficio/costo es 1,0. En esta línea los ingresos decontados igualan a los costos descontados. En el ejemplo del Anexo 2, se puede ver que para un valor porcentual de la ganancia de 2,5% se requiere una tasa de interés del 10% para alcanzar la línea de equilibrio, mientras que para una tasa de interés de sólo 2%, un valor de la ganancia de 0,2% será suficiente.

Castellani y Prevosto (1970) calcularon que para una inversión anual en investigación y desarrollo de alrededor de \$ 250.000, la utilización del clon de álamo

I 214 en sustitución de los dos clones inferiores I 488 y el "Canadian" sobre un área total de 75.000 ha resulta en un aumento en el ingreso anual (sin descuento) entre 3,25 y 3,75 millones de dólares, dependiendo de la incidencia del hongo *Marssonina brunnea*.

Van Wyk y van der Sijde (1983) estimaron que, para un mejoramiento de 5% en pinos y 30% en eucaliptos, un programa de plantación anual de aproximadamente 50.000 ha (20.000 ha en pino y 30.000 ha en eucalipto) y un gasto de cerca de 0,5 millón de dólares, el eventual incremento en el valor de la cosecha (sin descuento) será de unos 20 millones de dólares anuales.

Plumptre y Barnes (1982) calcularon que, para los pinos de rápido crecimiento de tierras bajas tropicales (principalmente *Pinus caribaea* y *P. oocarpa*), la combinación de la selección entre y dentro de procedencias puede mejorar como mínimo la producción del volumen en un 20% y en un 5% la calidad, y que este mejoramiento, si se aplicara a 1,5 millones de hectáreas (el área total predicha para estas especies en el año 2000), significaría un incremento en el valor de la cosecha de principios del siguiente siglo de más de cien millones de dólares anuales.

En todos estos casos, es probable que los beneficios adicionales que se obtengan en el procesamiento y mercadeo de los productos de la madera sean varias veces el aumento del valor de la madera no procesada. Cuando se trata de grandes áreas de plantación, es claro que pequeñas inversiones en investigación y desarrollo pueden producir beneficios financieros muy grandes.

El incremento de la producción derivado del mejoramiento genético forestal puede ser utilizado de diversas formas. Por ejemplo, un aumento de un 15% en el rendimiento por ha, permite a los planificadores llenar un aumento de un 15% en la demanda. Por otra parte, si la demanda permanece estática, se podría llenar con un área de plantación un 15% menor. La reducción en el área se puede lograr rechazando los sitios de menor calidad, aumentando así el rendimiento promedio del área plantada, o excluyendo los sitios de menos accesibilidad, disminuyendo el costo promedio de aprovechamiento y transporte. Cualquiera de estas opciones produce beneficios económicos adicionales. Como una alternativa, también se puede plantar toda el área y reducir la edad de corta. Cualquier reducción en la rotación mejora la TIR del proyecto, pero esta ventaja se podría perder si la calidad de la madera, y por tanto su valor, es inferior al usual en la "rotación normal". Se necesita entonces información detallada de las características de las especies para valorar correctamente las posibilidades que el mejoramiento forestal ofrece.

Además de aumentar los ingresos, el mejoramiento forestal puede reducir los costos. Si el material mejorado tiene un mayor crecimiento inicial, el dosel se cerrará más rápido, reduciendo el tiempo en que se necesita el control de malezas. Por ejemplo, es posible reducir el número de limpiezas de 5 a 4 y el ahorro en los costos al inicio de la rotación que tiene un efecto significativo en el éxito económico del

proyecto. Al mismo tiempo, un incremento en la uniformidad de las plantaciones puede cambiar los métodos de raleos selectivos por raleos sistemáticos más baratos. La evaluación cuantitativa de la reducción en los costos de manejo generalmente no se incluye en los análisis económicos, pero los ahorros pueden ser sustanciales.

Es abrumadora la evidencia existente de que, dondequiera que exista un programa de plantación importante, el mejoramiento forestal (selección de procedencias y selección individual) en los trópicos será capaz por lo menos de autofinanciarse. Es muy probable que los beneficios económicos sean excelentes en la mayoría de las especies. Mirándolo desde otro punto de vista, nadie puede correr el riesgo de sufrir las pérdidas sustanciales que resultarán de no implementar programas de mejoramiento realistas.

## 7. LITERATURA SELECCIONADA

- Andersen, K.F. 1966. Economic evaluation of results from provenance trials. Lecture to FAO/DANIDA. Seminar on forest seed and tree improvement, Denmark July-August 1966. Mimeo. 8p.
- Barner, H. 1986. Economic aspects of tree improvement. Danida Forest Seed Centre. Humlebaek, Denamrk. Mimeo. 5p.
- Barnes, R.D. 1978. Population improvement through selection and hybridization in *Pinus patula*, *Pinus elliottii* and *Pinus taeda* in Southern Africa. Paper FO-FTB-77-3/3 for Third World Consultation on For. Tree Breeding, Canberra, Vol. 2:489-505p.
- Barnes, R.D.; Mullin, L.J. 1984. *Pinus patula* provenance trials in Zimbabwe - seventh year results. *In* Provenance and genetic improvement strategies in tropical forest trees. Ed. R.D. Barnes and G.L. Gibson. Proc. Jt. Work Conf. IUFRO, Mutare, Zimbabwe 1984. p.151-152.
- Barnes, R.D.; Gibson, G.L. 1986. A method to assess stem straightness in tropical pines. *Commonw. For. Rev.* 65(2):168-171p.
- Bouvet, J.M.; Delwaulle, J.C. 1983. Introduction d'*Eucalyptus cloeziana* á Congo. *Bois et For. Trop.* 200, 7-20. Div. 2, Vol. II: 600-613p.
- Buijtenen, J.P.; Saitta, W.W. 1972. Linear programming applied to the economic analysis of forest tree improvement. *J.Forestry* 70(3):164-167p.