



World Agroforestry Centre  
TRANSFORMING LIVES AND LANDSCAPES

# Introducción a la Genética y Domesticación Forestal para la Agroforestería y Silvicultura

**Volúmen del árbol a los 15 años**

**Intensidad de sel. 1 en 10,000**  
 $i = 3.96$

$P_0$

$1.0 \text{ m}^3$

$\Delta G = i \times \delta p \times h^2$   
 $\Delta G = 3.96 \times 0.18 \times 0.27$   
 $\Delta G = 19.2\%$

$P_1$

$1.192 \text{ m}^3$



World Agroforestry Centre  
TRANSFORMING LIVES AND LANDSCAPES

# Introducción a la Genética y Domesticación Forestal para la Agroforestería y Silvicultura

Notas de clase

Jonathan P. Cornelius y L. Julio Ugarte Guerra

World Agroforestry Centre, 2010



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

1. Agroforestería; 2. Mejoramiento Genético;  
3. Genética Forestal; 4. Domesticación

Revisor técnico: Leonardo Gallo; Nahum Sánchez

Fotografías: ICRAF

Diseño gráfico: Milton Hidalgo

Se autoriza la reproducción de esta publicación con finalidades educativas y otros fines no comerciales sin el previo permiso escrito de quien tenga los derechos del autor con tal que se mencione la fuente. Se prohíbe la reproducción de esta publicación para venta o para otras finalidades comerciales sin el previo permiso escrito de quien tenga los derechos de autor.

Esta publicación contó con recursos provenientes del apoyo financiero institucional proporcionado al ICRAF por los Gobiernos de Perú, Dinamarca, Irlanda, Holanda, Noruega, Suecia, Estados Unidos, y Finlandia. La responsabilidad integral por el contenido presentado en esta publicación es de los autores.

Se agradece el auspicio de INCAGRO para la publicación.

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	v
<b>1.0 TERMINOLOGÍA</b> .....	1
<b>2.0 GENÉTICA Y ECOLOGÍA REPRODUCTIVA DE LOS ÁRBOLES TROPICALES</b> .....	3
<b>2.1 Sistemas sexuales y sistemas de apareamiento de los árboles tropicales</b> .....	3
<b>2.2 El flujo de alelos en los árboles tropicales</b> .....	4
<b>2.3 Variabilidad genética de los árboles tropicales</b> .....	5
<b>2.4 Parámetros genéticos</b> .....	8
<b>2.5 Estimación de la tasa de endogamia, t</b> .....	9
<b>2.6 La biotecnología en el mejoramiento genético agroforestal</b> .....	12
<b>3.0 CÓMO EVITAR PROBLEMAS GENÉTICOS EN LA AGROFORESTERÍA, SILVICULTURA DE PLANTACIONES Y MANEJO DE BOSQUES NATURALES</b> .....	14
<b>3.1 Principales problemas genéticos</b> .....	14
<b>3.2 Utilice material genético adaptado al ambiente</b> .....	14
<b>3.3 Uso de semilla de base genética amplia</b> .....	15
<b>3.4 Utilice semilla de árboles de buena calidad fenotípica o genética</b> ....	16
<b>3.5 Combate la deforestación y fragmentación del bosque</b> .....	17
<b>3.6 Riesgos del traslado de semilla forestal</b> .....	17
<b>3.7 Razas locales</b> .....	17
<b>3.8 Interacción genotipo-ambiente</b> .....	19
<b>3.9 ¿De dónde consiguen los agricultores su germoplasma forestal?</b> .....	19
<b>3.10 El efecto de utilizar semillas de árboles “plus”</b> .....	20
<b>3.11 Efectos genéticos de la deforestación</b> .....	20
<b>3.12 Efectos genéticos y reproductivos de la fragmentación y degradación de los bosques</b> .....	21
<b>4.0 EL MEJORAMIENTO GENÉTICO AGROFORESTAL EN LA DOMESTICACIÓN: UN REPASO SINTÉTICO</b> .....	23
<b>4.1 La domesticación agroforestal</b> .....	23
<b>4.2 Objetivos del mejoramiento genético agroforestal</b> .....	23
<b>4.3 La fijación de prioridades: una etapa preliminar esencial</b> .....	24
<b>4.4 Tipos de Fuente Semillera Mejorada</b> .....	24
<b>4.5 Justificación y factibilidad del mejoramiento genético</b> .....	25
<b>4.6 Cómo se hace el mejoramiento genético: aspectos técnicos</b> .....	34

4.7	Parámetros genéticos .....	37
4.8	Ganancias genéticas en especies forestales .....	44
4.9	Los sistemas agroforestales .....	44
4.10	Variación genética en poblaciones mejoradas .....	44
4.11	Priorización de especies en la domesticación y mejoramiento .....	45
4.12	Criterios de selección en el mejoramiento genético forestal .....	50
4.13	Rodales semilleros .....	50
4.14	Ensayos de procedencias .....	68
4.15	Estimación de la ganancia genética .....	82
4.16	Las ventajas de la clonación de los árboles plus .....	83
4.17	Los huertos semilleros .....	84
4.18	Apéndice sobre injertado .....	99
4.19	Ensayos de descendencias .....	100
4.20	Análisis financiero del mejoramiento .....	104
5.0	<b>CÓMO SE HACE EL MEJORAMIENTO GENÉTICO: LOS ENFOQUES TRADICIONALES Y PARTICIPATIVOS .....</b>	<b>108</b>
6.0	<b>DOMESTICACIÓN DE ÁRBOLES AGROFORESTALES EN LA AMAZONIA PERUANA .....</b>	<b>109</b>
7.0	<b>PRIORIDADES EN EL ESCENARIO PERUANO .....</b>	<b>118</b>
8.0	<b>EL MEJORAMIENTO GENÉTICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>119</b>
8.1	Consideraciones generales del mejoramiento .....	119
8.2	Conservación del germoplasma mejorado y de diversidad genética .....	119
8.3	Migración asistida .....	119
9.0	<b>SECCIÓN 3.\BIBLIOGRAFÍA SELECTA Y REFERENCIAS CITADAS .....</b>	<b>120</b>

## PRESENTACIÓN

---

Desde el origen del género humano su relación con los bosques naturales ha sido siempre muy estrecha. Durante la época previa al descubrimiento de la agricultura, la dependencia de las poblaciones humanas hacia el bosque era completa, pues este proveía de los elementos esenciales para asegurar la supervivencia tales como: alimentos, energía, materiales para la construcción de viviendas y defensa. El descubrimiento de la agricultura no disminuyó la dependencia del bosque, sin embargo, en extensas áreas originalmente boscosas se inicia un proceso de producción agrícola, dando lugar al retroceso del bosque, lo que implica un mayor esfuerzo para conseguir leña, madera de construcción y otros productos forestales.

Es claro que el aumento de la población humana ha tenido consecuencias en la reducción del área boscosa que en un principio ocupaba el 70% de todas las tierras emergidas y hoy tan solo ocupa el 26%, el retroceso continúa hasta el día de hoy, principalmente en las zonas tropicales.

La domesticación de especies arbóreas comienza casi al mismo tiempo que la domesticación de especies agrícolas, principalmente en aquellas especies forestales usadas en la alimentación como los frutales y las nueces; una de las formas tradicionales de domesticación son los huertos familiares amazónicos, donde la población selecciona especies e individuos de áreas silvestres y los traslada a un ambiente mejor controlado cerca de su vivienda, esta es la forma tradicional de domesticación de las principales especies nativas amazónicas tales como el cacao o el caucho, proceso que continúa hasta el día de hoy.

Actualmente el comercio internacional de productos basados en la domesticación de árboles y arbustos es de una importancia económica notable, algunos de estas especies como el café, el té, los dátiles, manzanos y otros sustentan el ingreso de millones de pequeños productores que en algunos casos usan sistemas agroforestales muy diversos en su producción, en muchos casos estos productos de la domesticación son los principales generadores del ingreso para las familias menos favorecidas de las naciones menos desarrolladas.

Desde la perspectiva de ICRAF la domesticación de árboles agroforestales comprende las actividades humanas para promover un cambio acelerado e inducido en las características de especies seleccionadas para un cultivo más intensivo y una distribución más amplia. Este proceso continuo se basa en hallazgos científicos que incluyen la identificación botánica de la especie de interés, la producción, gestión y adopción de germoplasma de características deseables. En las actividades agroforestales las características deseables del germoplasma incluyen la productividad, viabilidad y diversidad. Las estrategias individuales a usarse varían de acuerdo a las características de la especie y al uso, biología, alternativas de manejo y

consideraciones ambientales. El proceso de domesticación puede ocurrir en cualquier punto entre el estado silvestre y el genéticamente seleccionado. La intensidad de las actividades de domesticación para una especie determinada estará orientada por una combinación de factores biológicos, científicos, políticos, económicos y sociales. En contraposición a la domesticación basada en características intrínsecas de la especie existe otro marco conceptual dirigido a la domesticación de los ecosistemas que es desarrollada por el manejo forestal.

Las actividades de mejoramiento genético forestal serían una parte importante de las actividades necesarias para contribuir a la domesticación de las especies arbóreas. Este manual es una contribución a este proceso interdisciplinario, esperando que sea útil para aquellos estudiantes e investigadores que necesitan una aproximación rápida y completa aunque no exhaustiva sobre este tema, con el objetivo de difundir los beneficios de la domesticación de especies arbóreas y su aplicación en los sistemas agroforestales.

# 1.0 TERMINOLOGÍA DE LA VARIACIÓN GENÉTICA ENTRE POBLACIONES

Durante el desarrollo de nuestro curso revisaremos algunos conceptos prácticos que deben estar sumamente claros previamente, es por ello que entregamos a usted un corto glosario de términos los cuales debe usted revisar cuidadosamente.

## “Ecotipo”

Según Zobel y Talbert (1984) se define como: “un grupo de plantas de genotipo parecido que ocupan un nicho ecológico específico”. El concepto de ecotipo fue sugerido por Turesson (1922) quien lo definió como la “respuesta genecológica de una especie a un ambiente específico”. “Ecotipo” no es sinónimo de una accesión en un banco de germoplasma, aunque a veces se utiliza el término en esta manera equívoca.

## “Origen”

Significa el área geográfica original (en el bosque nativo) donde crecieron los árboles progenitores (Mesén, 1994). Por ejemplo, si se recolecta semilla de un rodal semillero en Yurimaguas de teca, establecido con semilla de Chiang Mai, Tailandia, la procedencia sería Yurimaguas, mientras el origen sería Chiang Mai.

## “Población”

Es un grupo de árboles entre los cuales normalmente hay intercambio de alelos (apareamiento).

## “Procedencia”

Es un término útil que significa simplemente el lugar donde un lote de semilla ha sido colectado. En sí, es una simple “ubicación geográfica” sin ninguna implicancia biológica. Sin embargo, a veces hay diferencias genéticas importantes entre procedencias de una misma especie. Para una definición más completa y adecuada vea la sección de Pruebas de Procedencia y sus definiciones en la página 83.

## “Raza local”

Se refiere normalmente a una población de una especie exótica, que se han adaptado por selección natural al ambiente específico donde fueron plantados (Mesén, 1994).

## “Variedad”

Es un término que prácticamente no se utiliza en el sector forestal. Normalmente, las fuentes mejoradas son altamente variables (sus promedios son altos, pero retiene variación genética) y no tiene suficiente uniformidad como para registrarse como variedades (cultivares). Existen variedades taxonómicas de algunas especies (ej. *Pinus*



*caribaea* var. *Hondurensis*), pero este uso del término “variedad” no tiene nada que ver con las variedades de maíz y otros cultivos, que son producto del mejoramiento genético o domesticación tradicional. En el caso de los frutales, sí se usa el término en el mismo sentido que se utilizan para las variedades comunes de maíz, etc., porque normalmente se trata de genotipos estables (clones, en muchos casos).

## 2.0 GENÉTICA Y ECOLOGÍA REPRODUCTIVA DE LOS ÁRBOLES TROPICALES

Se tratarán los siguientes aspectos de la genética y biología reproductiva de los árboles tropicales:

- Sus **sistemas sexuales y sistemas de apareamiento**, especialmente la alta incidencia de autoincompatibilidad.
- Su alta capacidad para mantener el flujo de alelos entre poblaciones.
- Su alta variabilidad genética.

Obviamente, con estos tres temas no se pretende ofrecer una descripción completa de los temas de genética y ecología reproductiva, sino presentar aspectos clave de tres subtemas con importantes implicancias para el mejoramiento genético.

### 2.1 SISTEMAS SEXUALES Y SISTEMAS DE APAREAMIENTO DE LOS ÁRBOLES TROPICALES

- El **sistema sexual** se refiere a la distribución de sexos. Los árboles tropicales exhiben tres tipos principales.

- 1 **Dioecia.** hay flores masculinas y flores femeninas en árboles diferentes
- 2 **Monoecia.** monoico hay flores masculinas y flores femeninas, las cuales se encuentran en el mismo árbol
- 3 **Hermafroditismo.** monocino las flores son perfectas, o sea con partes masculinas y partes femeninas
  - **Bisexualidad.** donde se incluye monoecia y hermafroditismo. Desde el punto de vista genético el resultado es casi idéntico

En el caso de los árboles tropicales, 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%).

- En el contexto de los árboles, el **sistema de apareamiento** se refiere principalmente a la proporción de descendencias que son productos de cruces entre árboles diferentes (alogamia), en contraste con los autocruces (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. En valor de  $t$  varía entre 0 y 1;  $t=1$  indica alogamia total, mientras  $t=0$  indica autogamia total. Típicamente, en los árboles tropicales el valor de  $t$  es superior a 0.85.
  - Los experimentos de polinización controlada han demostrado que la gran mayoría (alrededor de 80%) de las especies de árboles tropicales son **autoincompatibles**, o sea en estas especies los árboles no pueden autofertilizarse, sino que el polen debe provenir de otro árbol.

- La autoincompatibilidad explica los altos niveles de  $t$ , la tasa de alogamia, 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 implicancias:
  - Significa que hay un constante movimiento de polen (y por lo tanto, alelos) entre árboles de la misma especie, lo cual promueve la heterocigosidad.
  - Significa que 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.
  - Debido a su alta heterocigosidad, las especies forestales frecuentemente tienen una **carga genética** alta de alelos nocivos. Por ser recesivos, estos alelos nocivos normalmente no se manifiestan. Sin embargo, cuando hay apareamiento entre parientes cercanos, es más probable que ocurran en forma homocigótica. En este caso estos alelos recesivos pueden provocar problemas como el albinismo, un crecimiento raquítrico o baja producción de semilla (=depresión endogámica).
- 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, por ejemplo la dicogamia (la dispersión del polen y la maduración de los estigmas del mismo árbol no coinciden en tiempo). En estas especies también las progenies derivadas de autocruces o incluso cruces entre parientes cercanos frecuentemente padecen de depresión endogámica.
- *Leucaena leucocephala* constituye una excepción importante, por ser **autocompatible**.

## 2.2 EL FLUJO DE ALELOS EN LOS ÁRBOLES TROPICALES

- 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. Ambos procesos entran en lo que se define como “migración” (= flujo génico), lo que es considerado como una de las 4 principales fuerzas evolutivas. Se define como el pasaje de alelos entre poblaciones. Ocurre a través de dos mecanismos principales: la dispersión de semillas 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, ej. Murciélagos. La dispersión por viento es poco común en las especies tropicales (los pinos tropicales representan una excepción importante).

- La mayor parte del polen es trasladada a 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.
  - Por lo tanto, muchos grupos de árboles o árboles individuales que están aislados espacialmente **no están aislados en términos reproductivos**. Intercambian alelos con otras poblaciones y así estas poblaciones “aisladas” se mantienen genéticamente variables.
- La semilla también puede ser transportada por largas distancias, aunque la dispersión de polen contribuye más al flujo alélico.
  - Aunque una pequeña proporción del polen y la semilla puede viajar largas distancias, la mayor parte permanece cerca el árbol polinizador o árbol semillero. Como consecuencia, dentro de las poblaciones puede haber una **estructura genética espacial**, que significa que 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. (Stacy, 2001).
  - Equilibrio de Hardy y Weinberg (equilibrio HB) es un principio procedente de la genética de poblaciones, indica que las poblaciones de gran tamaño no sufren cambios en su composición (frecuencias alélicas) si las poblaciones no reciben influencia del medio ambiente ni sufren mutaciones, es decir, que la herencia no es fuente de cambios evolutivos, fue propuesta por el matemático inglés Godfrey Harold Hardy y el médico alemán Wilhelm Weinberg en forma paralela a principios del siglo XX.

## 2.3 VARIABILIDAD GENÉTICA DE LOS ÁRBOLES TROPICALES

- La variación genética se puede medir en dos maneras principales. Primero, en términos de variación en marcadores moleculares y segundo, en términos de variación morfológica. Al hablar de variación morfológica se entiende como una idea 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 o riqueza alélica) y  $H_e$  (diversidad génica o heterocigosidad esperada).
- Las especies de árboles tropicales 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 debe principalmente al 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 un aislamiento reproductivo.
- La variabilidad genética se manifiesta también en la morfología de los árboles, es decir en diversas características como sus tasas de crecimiento, la densidad de su madera, su fenología, la 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 medioambiente. 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 genéticos cuantitativos como las varianzas genotípicas y la heredabilidad.
- Normalmente, la distribución de la variación genética morfológica entre y dentro de poblaciones es parecida 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 el mismo lugar (ej. Ensayos de procedencias, prueba de progenie).
  - Es normal que las descendencias (hijos) de dos árboles diferentes de la misma población difiera hasta en 100% en su tasa de crecimiento y en otras características, aun cuando estas crecen en las mismas condiciones de suelo y clima.
  - Cuando una especie ocupa un rango geográfico grande, 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.

## 2.4. Parámetros genéticos

### Parámetros a nivel molecular

Considere una población de 1000 individuos con las siguientes frecuencias genotípicas para tres loci A, B y C. A1, A2, etc., indican los alelos:

	Genotipos									
	A1A1	A1A2	A2A2	B1B1	B1B2	B1B3	B2B2	B2B3	B3B3	C1C1
Número de individuos	640	350	10	120	200	40	595	40	5	1000
Frecuencias alélicas	$f(A1) = (1280+350)/2000=0,82$ $f(A2) = (350+20)/2000=0,18$			<ul style="list-style-type: none"> <li><math>f(B1) = (240+200+40)/2000=0,24</math></li> <li><math>f(B2) = (200+1190+40)/2000 =0,71</math></li> <li><math>f(B3) = (40+40+10)/2000 =0,05</math></li> </ul>					$f(C1)=2000/2000=1,0$ (locus <b>monomórfico</b> )	
P (porcentaje de loci polimórficos)	$P = 2 / 3 = 66\%$ (loci A y B tienen más de un alelo, y por lo tanto son polimórficos. Locus C es monomórfico. En algunos estudios se consideran que cualquier locus en que el alelo más común tiene frecuencia mayor de 0,99 es monomórfico)									
A (riqueza alélica)	Locus A = 2, Locus B = 3, Locus C = 1. Promedio de Riqueza Alélica = 2									
Diversidad génica (=heterocigosidad esperada) ( $H_e$ )	$Locus A = 1-(f(A1)^2+f(A2)^2) = 1-(0,82^2+0,18^2) = 1-(0,67+0,03) = 0,3$			$Locus B = 1-(f(B1)^2+f(B2)^2+f(B3)^2) = 1 - (0,06+0,50+0,002) = 0,44$					$Locus C = 1 - f(C1)^2 = 1 - 1^2 = 0$	
	$H_e$ (promedio) = $(0,3 + 0,44 + 0)/3 = 0,25$									
Heterocigosidad observada	$H_o = 350 / 1000 = 0,35$			$H_o = (200+40+40) / 3 = 0,28$					$H_o = 0$	
F (coeficiente de endogamia)	$F = (H_e - H_o) / H_e = (0,3 - 0,35) / 0,3 = -0,05$			$F = (H_e - H_o) / H_e = (0,44 - 0,28) / 0,44 = 0,36$					indefinido	

El artículo por Berg y Hamrick (1997) describe cómo calcular estos y otros parámetros genéticos

## 2.5 ESTIMACIÓN DE LA TASA DE ALOGAMIA, t

Hay dos métodos principales de estimar la tasa de alogamia (t), que es el % de semilla originada por intercambio de material genético entre 2 individuos genéticamente diferentes.

### Por comparaciones entre polinización abierta y controlada

Según Charlesworth (1988) la frecuencia de las autocruzas (*self-crossing*) puede estimarse como sigue:

$$S = \frac{P_x - P_o}{P_x - P_s}, \text{ donde}$$

$P_x$  = la viabilidad de semillas derivadas de alogamia (efectuado por polinización controlada);

$P_o$  = la viabilidad de semillas derivadas de polinización abierta;

$P_s$  = la viabilidad de semillas derivadas de autogamia (efectuado por polinización controlada);

Posteriormente, se estima la tasa de alogamia como 1-S.

El método funciona únicamente si la viabilidad de semillas producto de la autogamia y la viabilidad de semillas producto de la alogamia son diferentes.

### Por marcadores moleculares

También, se puede estimar la tasa de alogamia con base en una muestra de los genotipos de las progenies en una población. Normalmente, se utilizan marcadores moleculares codominantes, donde en el heterocigoto se expresa ambas características fenotípicas (dominante y recesiva). Primero, se averiguan los genotipos (en varios loci) de alrededor de 20 progenies de un mínimo de 20 árboles por población. El software desarrollado por Ritland (1990) y otros utiliza esta información para inferir los genotipos de los árboles madres (en caso que este no sea conocido) y determinar cuáles progenies se derivan de la alogamia y cuáles son productos de la autofertilización. Los programas pueden proporcionar estimaciones de la tasa de alogamia promedio de la población y para los árboles individuales.

Cuando se utilizan varios loci, se pueden estimar dos tipos de valor de t:  $t_i$ , el promedio de las tasas de alogamia estimadas para cada locus individual, y  $t_m$ , una estimación basada en interpretación simultánea de todos los loci. A veces  $t_m$  es menor que  $t_i$ ; la diferencia entre los dos es una medida del apareamiento entre familiares o **endogamia biparental**.



## Valores de la tasa de alogamia (t) en los árboles tropicales

Boshier (2000) proporciona las siguientes estimaciones de  $t$  en árboles tropicales, derivadas de estudios de varios autores:

Especie	$t_m$ Promedio	$t_m$ rango
<i>Acacia auriculiformis</i>		0,92-0,93
<i>Acacia crassicarpa</i>		0,93-0,99
<i>Bertholletia excelsa</i>	0,85	
<i>Brosimum alicastrum</i>	0,88	
<i>Cavanillesia platanifolia</i>		0,21-0,66
<i>Cordia alliodora</i>	0,98	
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,84	
<i>Eucalyptus urophylla</i>		0,90-0,91
<i>Pithecellobium pedicilare</i>	0,95	
<i>Platypodium elegans</i>	0,92	
<i>Pinus caribaea</i>		0,85-0,92
<i>Pinus kesiya</i>		0,68-0,97
<i>Pinus caribaea</i>		0,81-0,96
<i>Shorea congestifolia</i>	0,87	
<i>Shorea trapezifolia</i>		0,54-0,62

## Marcadores moleculares

Hay dos tipos principales de marcador molecular: isoenzimas y marcadores ADN. Las isoenzimas fueron desarrolladas como marcadores genéticos en los años setenta.

Las isoenzimas son diferentes formas de la misma enzima, las cuales corresponden a diferentes alelos de un locus. Pueden ser extraídas del tejido vegetal y después separadas por electroforesis (porque las diferentes formas demuestran diferentes movilidades). Posteriormente, pueden ser visualizadas utilizando tintas específicas para cada enzima. Las isoenzimas son menos poderosas que algunos marcadores ADN, por ser menos numerosas (menos loci) o menos variables (menos alelos), pero ofrecen las ventajas de ser codominantes, relativamente baratas y no tan exigentes en términos técnicos. Por estas razones, mantienen su vigencia como marcadores.

Los marcadores ADN son fragmentos de ADN, normalmente amplificados utilizando la reacción PCR. La mayoría son derivados no de genes como tales,

sino de las regiones intergénicas del ADN. Probablemente los más utilizados en el campo de la genética forestal son los SSRs o microsatélites y los AFLPs. Los microsatélites son segmentos de ADN con repeticiones de secuencias simples de las bases de nucleótidos. Los alelos difieren en el número de repeticiones. Los SSRs son marcadores codominantes y altamente polimórficos (muchos alelos). Son muy útiles cuando se requiere un alto poder discriminatorio entre diferentes genotipos (ej. análisis de paternidad, sistemas de apareamiento). Los AFLPs son marcadores dominantes, cuya ventaja principal es la gran cantidad de loci que pueden ser generadas.

Fuente: Glaubitz y Moran, 2000.

## Marcadores dominantes y marcadores codominantes

Los marcadores codominantes son marcadores en los cuales pueden ser distinguidos ambos alelos de un genotipo heterocigótico. Los SSRs y la gran mayoría de isoenzimas son codominantes. El genotipo heterocigótico de un marcador dominante es indistinguible de uno de los homocigotas (el dominante).

## Mecanismos de incompatibilidad

La autocompatibilidad está controlada genéticamente. En las angiospermas, opera más comúnmente en la etapa precigótica, impidiendo la fertilización, normalmente por inhibición del desarrollo del tubo de polen. El mecanismo es controlado por uno o más genes con alelos múltiples; la fertilización es impedida cuando ocurre el mismo alelo en el polen y en el pistilo), condición que se da en el caso de la autopolinización o cuando el árbol polinizado es pariente cercano del árbol receptor.

Fuente: Boshier, 2000.

## Depresión endogámica en los árboles forestales

### Ejemplo 1: Coníferas

En *Pinus radiata*, árboles de 12 años derivados de cruces controlados entre medios-hermanos y de autocruces tenían dap de 5% y 15%, respectivamente, menor que los árboles derivados de alogamia (Wu et al., 1998).

En nueve especies coníferas, el porcentaje de semillas llenas promediaba 17.4% en autocruces y 53.7% en semilla derivada de cruces alogámicos. En seis especies coníferas, la altura de progenies autogámicas de varias edades era en promedio 72% la altura de progenies alogámicas (Williams and Savolainen, 1996)

### Ejemplo 2: *Dombeya acutangula ssp. acutangula* (Sterculiaceae)

La especie es nativa a la Isla Reunión en la Océano Índico. Los árboles

individuales varían en su grado de autocompatibilidad. Las inflorescencias fertilizadas artificialmente con polen de otros árboles produjeron menos de 10% de semillas aplanadas, mientras que las inflorescencias fertilizadas con polen del mismo árbol produjeron un promedio de aproximadamente 50% de semillas aplanadas. Las semillas aplanadas son más livianas y tienen menor porcentaje de germinación (*Gigord et al., 1998*).

### **Ejemplo 3: *Syzygium rubicundum***

La especie es nativa al bosque tropical de Sri Lanka. En *S. rubicundum*, la producción de frutos en árboles polinizados por vecinos (4-135m separación) era aproximadamente 2%, versus 10% en el caso de la fertilización entre árboles separados por 1-2 km (*Stacy, 2001*).

## **El movimiento de larga distancia del polen**

### **Ejemplos**

*Hamrick y Nason (2000)* proporcionan las siguientes estimaciones del porcentaje de polen inmigrante y de distancia recorrida en poblaciones aisladas de 9 especies tropicales (derivados de varios autores):

<b>Especie</b>	<b>Familia</b>	<b>% de polen inmigrante</b>	<b>Distancia movida (m)</b>
Calophyllum longifolium	Cluisaceae	62	>210
Cordia alliodora	Boraginaceae	3	>280
Enterolobium cyclocarpum	Mimosaceae	60	>250
Ficus (>3 especies)	Moraceae	>90	>1000
Pithecellobium elegans	Mimosaceae	15	>350
Platypodium elegans	Papilionaceae	36-77	>100
Spondias Bombin	Anacardiaceae	44	>200
Tachigali versicolor	Caesalpinaceae	25	>500
Turpinia occidentales	Staphlyaceae	1-27	>130

Nason et al. (1996, Citado en Hamrick y Nason, 2000) encontraron que las avispas pequeñas que polinizan las especies de Ficus que estudiaron en Panamá son capaces de transportar polen por distancias de hasta 14km.

## **2.6 LA BIOTECNOLOGÍA EN EL MEJORAMIENTO GENÉTICO AGROFORESTAL**

- Según la FAO (2006), en el campo forestal, hay cinco categorías principales de actividad en la biotecnología: la modificación genética (o GM, por sus siglas en

ingles) (19% de actividades); la caracterización de diversidad genética utilizando marcadores moleculares (26%); la genómica, mapeo genético y la selección asistida por marcadores (SAM) (21%); la micropropagación (34%).

- Al fin de 2004, se habían liberado árboles “GM” en sólo un país (China), aunque existía ensayos de campo en 16 países, principalmente con *Populus*, *Pinus*, *Liquidambar* y *Eucalyptus*.
- Se ha logrado secuenciar el genoma de *Populus*, y hay trabajos en marcha con *Eucalyptus* y *Pinus*.

La micropropagación se utiliza en por lo menos 64 países y hasta el momento constituye la biotecnología de mayor uso comercial en el campo forestal.

# 3.0 CÓMO EVITAR PROBLEMAS GENÉTICOS EN LA AGROFORESTERÍA, SILVICULTURA DE PLANTACIONES Y MANEJO DE BOSQUES NATURALES

## 3.1 PRINCIPALES PROBLEMAS GENÉTICOS

Hay dos tipos principales de problemas genéticos que pueden presentarse. Primero, por razones genéticas, los árboles **crecen lentamente o presentan otras características indeseables**. Segundo, **puede haber pérdida de variación genética**.

## 3.2 UTILICE MATERIAL GENÉTICO ADAPTADO AL AMBIENTE

- Las poblaciones de árboles están adaptadas a su ambiente natural. Cuando se traslada semilla de una zona ambiental (donde ocurren los árboles semilleros) para hacer plantación en otra zona ambiental, los resultados son impredecibles y normalmente adversos (ver riesgos del traslado de semilla).
  - En muchos países existen **zonas semilleras** entre las cuales no se permite o se desaprueba el traslado de semillas.
  - Idealmente, se deben realizar pruebas de procedencias antes de trasladar semilla de una zona para otra.
    - Si no se cuenta con información de pruebas de procedencias, es mejor no trasladar semilla. En la Amazonía peruana, no es aconsejable trasladar semillas entre la selva alta y la selva baja o, por ejemplo, entre Madre de Dios y el norte de Loreto (ej. Iquitos). **Es mejor utilizar semillas locales**.
- El riesgo es igual o mayor en el caso de las especies exóticas, porque no es fácil saber las similitudes ambientales entre la región de origen y la región de plantación.
  - Algunas especies exóticas inicialmente fueron consideradas inútiles (por ejemplo *Pinus contorta* en Escocia) porque se importó semilla de una procedencia inadecuada. A veces, una procedencia inadecuada puede llevar a conclusiones equivocadas sobre toda una especie.
    - Es importante realizar pruebas de procedencias al introducir una especie exótica.
  - Cuando una especie exótica ya está en el país, las semillas de la raza local (pag 18) frecuentemente producen plantas superiores a las derivadas de

las semillas colectadas en el rango natural. Sin embargo, la raza local no siempre es la mejor.

- En el caso de las especies exóticas, si existe una raza local con buen crecimiento y buena forma **debe preferirse**, a menos que se disponga de datos de ensayos de procedencias que indican la superioridad de otras procedencias.
- En los programas de mejoramiento, se desarrolla semilla o clones genéticamente superiores para ciertas características, **en condiciones específicas de clima y suelo y bajo regímenes silviculturales específicos**. Es decir, las poblaciones mejoradas están adaptadas no solo al ambiente natural donde fueron desarrolladas, sino también al ambiente silvicultural donde fueron seleccionadas.
  - Por tanto, la semilla mejorada para un régimen silvicultural (Ej. manejo intensivo) **no necesariamente retiene sus condiciones superiores bajo otras condiciones de manejo** (Ej. manejo menos intensivo).
    - La “semilla mejorada” importada debe verse con cautela, especialmente si las condiciones de uso local son distintas de las utilizadas por el mejorador.
    - Siempre debe compararse “semilla mejorada” importada con la raza local, si existe una.
    - Se utiliza el término **interacción genotipo-ambiente** cuando el comportamiento relativo de dos o más genotipos (procedencias, clones, etc.) no es el mismo en dos sitios diferentes. Es un fenómeno común.
  - Sin embargo, al introducir una “nueva especie”, la semilla mejorada de base genética amplia, representa una de las mejores opciones e idealmente debe incluirse en los ensayos de procedencias iniciales.

### 3.3 UTILICE SEMILLA DE BASE GENÉTICA AMPLIA

- 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 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).
  - No compre semilla de fuentes poco confiables. Es muy probable que la semilla provenga de uno o algunos pocos árboles con alta producción de semilla pero tal vez con malas características genéticas.
- **No siembre problemas futuros.** Comúnmente, los agricultores consiguen semilla o plantones, o en sus propiedades o en chacras vecinas. Ellos también hacen sus propias selecciones (así se han domesticado caso todos los

cultivos). Por lo tanto, al iniciar un programa de reforestación con agricultores, es importante iniciar con una **población fundadora** de base genética amplia.

- Si la población fundadora es genéticamente estrecha, las posibilidades futuras para el desarrollo de material superior son pocas. El “abanico” actual de diversidad define los límites de las posibilidades futuras.
- En el bosque manejado, procure maximizar el número de árboles semilleros. Programe el aprovechamiento para que este se haga después de la época de floración, para maximizar la base genética de las semillas producidas por los árboles semilleros. **No permita que el bosque se regenere con descendencias de un sólo o unos pocos árboles.**
- En el caso de las especies dióicas, al dejar árboles semilleros en el bosque natural es importante dejar también el mismo número de árboles masculinos. Si se dejan, 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), y en términos genéticos el tamaño de la población no es 22 sino siete (o sea la próxima generación tendrá variación genética equivalente a una población de siete árboles) (Hartl y Clark, 1989)

### 3.4 UTILICE SEMILLA DE ÁRBOLES DE BUENA CALIDAD FENOTÍPICA O GENÉTICA

- Existe una correlación entre los fenotipos de los árboles y sus genotipos. Es decir, en promedio, las descendencias de los árboles con fenotipos indeseables son inferiores a las descendencias de los árboles con fenotipos deseables.
  - Por ejemplo, en las plantaciones forestales, el genotipo explica por lo general un 10-30% de la variación fenotípica en la mayoría de las características. Este porcentaje se conoce como la heredabilidad. Su valor depende de la característica y también en la variabilidad del sitio (suelo, topografía, manejo, etc.).
  - Por tanto, se debe recolectar semilla solamente de los mejores árboles que se puedan encontrar, siempre respetando la cantidad mínima de 20 árboles. Así, podemos estar casi seguros de tener semilla de calidad superior.
  - Por el contrario, si se colecta semilla de 20 árboles inferiores (ej. 20 árboles con abundante producción de semilla, con copas bajas y fácilmente accesibles), es casi seguro que la semilla sea de calidad inferior. **Para evitar problemas genéticos, no recolecte semillas de árboles de mala calidad.**
  - Normalmente, al coleccionar semillas únicamente de árboles de muy buena calidad (los llamados “árboles plus”), las descendencias tendrán una superioridad de por lo menos 5-10% (ver ejemplos).
- La mejor semilla es la semilla **mejorada**. La semilla mejorada ha sido **comprobada genéticamente** a través de un ensayo de descendencias.

- En el Perú, según el Reglamento de Semillas Forestales, la única semilla genéticamente comprobada es la **Semilla Forestal Calificada 1**. Se encuentra con Semilla Forestal Calificada 1 actualmente en proceso de calificación de bolaina, capirona y pijuayo, disponible a través del ICRAF o directamente con PROSEMA (La Asociación de Productores de Semilla y Madera de Alta Calidad de la Cuenca del Aguaytía).
- En el bosque natural, deje árboles semilleros de buena calidad, y programe el aprovechamiento para que todos los árboles de buena calidad puedan contribuir con polen a la próxima generación.
  - Al cosechar los mejores árboles antes de que estos puedan contribuir con polen o semillas a la próxima generación, no se está practicando el mejoramiento genético sino el **empeoramiento genético**, lo cual constituye una **falta de ética profesional**, porque deteriora al bosque.

### 3.5 COMBATA LA DEFORESTACIÓN Y FRAGMENTACIÓN DEL BOSQUE

- La diversidad genética de las poblaciones de árboles (y otros organismos) es proporcional al tamaño de las poblaciones. La deforestación reduce el tamaño de las poblaciones o las elimina y, por ende, causa la pérdida de variación genética.
  - La diversidad genética es un componente fundamental de la biodiversidad y debe ser conservada, al igual que la diversidad al nivel de especies, ecosistema y paisaje.
  - Al perder su variación genética, las especies pierden la capacidad evolutiva para la adaptación a los cambios climáticos y a otras modificaciones ambientales y los seres humanos perdemos opciones de desarrollo de material mejorado.
- La fragmentación del bosque tiene varios efectos nocivos sobre la ecología reproductiva y la genética.
  - Se pueden mitigar los efectos nocivos de la fragmentación aumentando el número de árboles y sistemas agroforestales en los paisajes agrícolas, para que haya mayor conectividad entre los fragmentos y para minimizar los efectos de borde en las zonas de transición entre áreas boscosas y áreas agrícolas.

### 3.6 RIESGOS DEL TRASLADO DE SEMILLA FORESTAL

En general se considera un riesgo el traslado de semilla seleccionada para ciertas condiciones climáticas y edáficas a otro lugar sin una prueba previa de adaptación, debido a que según lo explicado existe una gran interacción entre el material genético de un lugar con precipitación, periodos secos definidos y características de suelos que es difícil de replicar en otras zonas.



**Adicionalmente existe el riesgo fitosanitario en el que a través de la semilla se puede transmitir enfermedades desconocidas en las nuevas zonas o se puede activar otro tipo de plagas que anteriormente no tenían importancia económica.**

**Ejemplo 1:** Muerte de árboles de una procedencia guatemalteca de *Alnus acuminata* al ser plantados en Costa Rica (Cornelius y Masi, 1995).

Se estableció un ensayo de procedencias-progenies de aliso en Santa Cruz de Turrialba (2300 m.s.n.m), con las siguientes procedencias: Palestina de los Altos, Guatemala (15 familias); División, Costa Rica (5 familias); Los Santos, Costa Rica (7 familias); Pacayas, Costa Rica (11 familias); Prusia, Costa Rica (6 familias). A los 31 meses, la procedencia guatemalteca fue significamente inferior a las procedencias costarricenses en las variables de crecimiento. A partir de los 31 meses, casi todos los árboles de la procedencia guatemalteca fueron atacados por el escarabajo *Scolytodes alni* y murieron. No hubo ataque en los árboles de las procedencias costarricenses.

**Ejemplo 2:** *Alnus rubra* en Colombia Británica, Canadá

Hamann et al. (2000) demostraron que al trasladar semilla de esta especie 100 km al norte o al sur de su lugar de origen disminuye en 2,5% la supervivencia a los 2 años y la altura disminuye en 5 cm.

### 3.7 RAZAS LOCALES

“Raza local” se refiere normalmente a la población de una especie exótica, que se ha adaptado por selección natural al ambiente específico donde fueron plantados (Mesén, 1994).

Existen varios ejemplos de superioridad de razas locales. Por ejemplo, en un ensayo de procedencias de *Eucalyptus saligna*, se registraron los siguientes valores de altura a los 5 años (Mesén, 1990):

Procedencia	Altura
Juan Viñas, Costa Rica	18,2m
New Raymond, Australia	13,5m
South Calliope, Australia	13,1m
Gladfield, Australia	12,6m

La razón de la superioridad de las razas locales no siempre es clara. Existen dos teorías. Primero, la raza local es mejor porque se ha adaptado a las condiciones

locales, posiblemente “ayudada” también por procesos de la selección durante la silvicultura (ej. selección en el vivero y en los raleos). Sin embargo, algunas razas locales sólo han estado en su ambiente exótico durante una generación. Es difícil que haya un cambio tan grande en tan poco tiempo. Segundo, la superioridad de las razas locales puede ser producto de **la eliminación de la endogamia natural**. En su nuevo ambiente de plantación, los árboles de la raza local pueden cruzarse entre sí, mientras en el bosque natural los árboles vecinos muchas veces son parientes, y por tanto la semilla padece algún grado de endogamia. Probablemente ambos factores contribuyen a la superioridad de la raza local.

Es importante tomar en cuenta que **la raza local no es siempre mejor**. Mucho depende en la calidad de la introducción original. Por ejemplo, en África Occidental existe una supuesta raza local de *Eucalyptus tereticornis* conocido como “12ABL”. Es derivada de un solo árbol en Madagascar (12ABL es una abreviación del francés por “árbol número 12 en la estación forestal Ambila-Lemaitso”. Obviamente es poco probable que una buena raza local pueda consolidarse sobre una base genética tan estrecha.

### 3.8 INTERACCIÓN GENOTIPO-AMBIENTE

#### **Ejemplo 1.** *Pinus radiata* en Australia

Matheson y Raymond (1986) describieron un ensayo de progenies de *P. radiata* con 30 progenies en 11 sitios diferentes. Había varios casos de cambio de rango entre los sitios. Por ejemplo, la familia 12408 era una de las cinco mejores en 5 sitios, pero en tres sitios figuró entre las peores cinco. Esto corrobora la afirmación que la familia citada tiene una gran interacción entre genotipo y ambiente.

#### **Ejemplo 2.** *Eucalyptus camaldulensis* en Egipto

Matheson y Raymond (1984) describieron el caso de un ensayo de procedencias en dos sitios en Egipto: uno en suelo arcilloso y otro en suelo arenoso y calcáreo. En el sitio arcilloso, la procedencia Lago Albacutya tenía la mejor supervivencia (100%) y la segunda mejor altura. En el sitio arenoso, tenía supervivencia de 37% - peor que otras 14 procedencias, y su altura fue inferior a la de otras 12 procedencias.

### 3.9 ¿DE DONDE CONSIGUEN LOS AGRICULTORES SU GERMOPLASMA AGROFORESTAL?

Según estudios del ICRAF (Weber et al, 1997), los productores en la Cuenca de Aguaytía procuran mucho de su semilla, tanto de árboles frutales como maderables, de sus propias chacras o de chacras vecinas. Al distribuir semilla o plantones en un programa de reforestación, es importante recordar que en el

futuro es probable que los agricultores recurran a los mismos árboles sembrados como fuentes de semilla. Por lo tanto, es importante distribuir semilla con alta diversidad genética.

### 3.10 Ejemplos del efecto de utilizar semilla de árboles “plus”

Las nuevas generaciones de árboles obtenidas a partir de un grupo de “árboles plus” tendrá mejores características dependientes de la efectividad de la selección.

*Diferencias en volumen (por unidad área o por árbol) entre progenies de árboles plus o progenies comunes (referencias originales en Cornelius, 1994)*

Especies	Diferencia en volumen
<i>Eucalyptus grandis</i> (clones)	+12,1%
<i>E. grandis</i> (semilla)	+7,7
<i>E. grandis</i>	+4,9%
<i>Cupressus lusitanica</i>	+18,0%
<i>Cupressus lusitanica</i>	+50,0%
<i>Pinus radiata</i>	+15,7%
<i>Pinus elliottii</i>	+18,8%
<i>Pinus elliottii</i>	+4,8
<i>Pinus elliottii</i>	+35,0%
<i>Pinus nigra</i>	+10,2% (promedio de 4 observaciones)
<i>Pinus pinaster</i>	+42,9%
<i>Pinus clausa</i>	+6,0
<i>Pinus palustris</i>	+33,0%

### 3.11 Efectos genéticos de la deforestación

Una consecuencia común de la deforestación es una reducción en tamaño de poblaciones, es decir en el número de individuos de cada especie. Cuando una población se reduce en tamaño, puede ser que algunos alelos, especialmente los alelos poco comunes, se pierdan. El número esperado de alelos remanentes después de una reducción en tamaño de la población es:

$$E = A - \sum_j (1 - p_j)^{2N}$$

Donde  $A$ =número de alelos antes de la reducción,  $p_j$ =frecuencia del  $j$ -ésimo alelo,  $N$ = tamaño de la población después de la reducción (Meffe y Carroll, 1994).

Por ejemplo, si hay cuatro alelos, uno con frecuencia 0,94 y tres con frecuencia 0,2 cada uno, se pierden 2 alelos al reducir la población a 10 individuos, mientras una reducción a 50 individuos resulta en una pérdida de 10% en riqueza alélica (Frankel y Soulé, 1981).

Estos cálculos asumen que la deforestación es aleatoria con relación a la estructura genética espacial. Si, por ejemplo, la deforestación está concentrada cerca de los ríos, y si una especie tuviera ecotipos diferentes en tierras altas y tierras inundables, la pérdida de variación podría ser más crítica.

La reducción en el tamaño de las poblaciones puede afectar también a la diversidad génica ( $H_e$ ), pero no se espera un impacto fuerte, porque se pierden principalmente aquellos alelos en baja frecuencia, los cuales inciden poco sobre el valor de  $H_e$ .

### 3.12 EFECTOS GENÉTICOS Y REPRODUCTIVOS DE LA FRAGMENTACIÓN Y DEGRADACIÓN DEL BOSQUE

Lowe et al. (2005) mencionan ejemplos de los siguientes tipos de impactos sobre los recursos genéticos forestales de la pérdida y degradación del habitat (ver artículos original para referencias).

Consecuencia	Causa(s), comentarios
Pérdida de diversidad génica ( $H_e$ )	Aislamiento a largo plazo de las poblaciones. Se espera una pérdida de variación únicamente si hay verdadero aislamiento en términos reproductivos, y si las poblaciones son pequeñas.
Aumento en la endogamia uniparental	Aumento en auto-polinización. Puede darse debido a una reducción en densidad de los individuos.
Aumento en la endogamia biparental	Menor movimiento de los polinizadores, combinado con la presencia de una estructura genética espacial caracterizada por la ocurrencia de grupos de individuos emparentados.
Menor producción de semilla	Baja polinización.
Semilla de mala calidad genética	Depresión de endogamia.
Mayores diferencias en fertilidad	Reducción en diversidad de los polinizadores. Cuando el polen es poco diverso, no existen tantas posibilidades para la selección natural entre cigotas de diferente calidad. Este factor puede incidir inclusive en especie autoincompatibles.

Consecuencia	Causa(s), comentarios
Aumento en movimiento de larga distancia de polen	El aumento de diferencias de fertilidad tiende a disminuir la variabilidad genética. Cuando un paisaje boscoso es reemplazado por un paisaje con fragmentos de bosque en una 'matriz' deforestada, los polinizadores pueden ser obligados a viajar distancias más grandes.

## Ejemplos de ganancia genética realizada en especies forestales

### Clones seleccionados

Zobel (1992) (citando Wallenberg Foundation, 1992), incluyen los siguientes valores para clones y material corriente de *Eucalyptus grandis* a los 7 años

Características	Árboles sin mejorar	Clones seleccionados	% de mejoramiento
Productividad (m <sup>3</sup> por ha por año)	33	70	+112
Densidad básica (Kg. / m <sup>3</sup> )	460	575	+25%

### Semilla de huertos semilleros

Especie	Característica	Ganancia genética (porcentaje)	Fuente
<i>Pinus taeda</i>	Índice de sitio Curvatura basal	3,9% 275	Lambeth 2000
<i>Pinus elliottii</i> <i>var. elliottii</i>	Índice de sitio Volumen por ha	4,3% 10,2%	Vergara et al., 2004 (huertos semilleros sin o con poco aclareo genético).
<i>Pinus nigra</i>	Dap Volumen	11% 32%	Matziris, 2000
<i>Pinus halapensis</i>	Dap	10,4%	Matziris, 2000
<i>Pinus echinata</i> <i>Pinus strobus</i> <i>Pinus taeda</i>	Volumen por ha Rectitud Volumen por ha Rectitud Volumen por ha Rectitud	30% 15% -3% 0% 5,3% 12,7%	La Farge, 1993

## 4.0 EL MEJORAMIENTO GENÉTICO

### AGROFORESTAL EN LA DOMESTICACIÓN: UN

### REPASO SINTÉTICO

El mejoramiento genético es un elemento de la domesticación. Aquí se presentan en forma sintética algunos apuntes de mayor relevancia al empleo del mejoramiento genético en el contexto de la domesticación agroforestal en el Perú.

#### 4.1 LA DOMESTICACIÓN AGROFORESTAL

- La domesticación es una disciplina más amplia que el mejoramiento genético. Además del mejoramiento, la domesticación incluye actividades tales como:
  - Identificación y desarrollo de mercados.
  - Desarrollo de técnicas silviculturales o agronómicas.
  - El estudio de sistemas de abastecimiento de germoplasma.
  - Producción y disseminación de información técnica.
- La domesticación es un enfoque integral al desarrollo de especies subutilizadas, integrando componentes esenciales como la genética, el manejo, el mercadeo y otros.

#### 4.2 OBJETIVOS DEL MEJORAMIENTO GENÉTICO AGROFORESTAL

- El objetivo principal del mejoramiento genético agroforestal es aumentar la productividad y/o calidad de los sistemas y prácticas agroforestales, a través del uso de semilla de calidad genética superior.
- Normalmente, “superior” se refiere a su comportamiento en cuanto a las tasas de crecimiento, la calidad del fuste, calidad de los frutos, etc. con respecto al material no mejorado. Sin embargo, la superioridad genética tiene también otra dimensión: la de su diversidad. **La semilla de calidad es también semilla de base genética amplia.**
  - Aumentar la uniformidad en la(s) característica(s) de interés económico es un objetivo importante del mejoramiento genético. No implica necesariamente la uniformidad en otras características.
  - A corto plazo, la variación genética en las poblaciones mejoradas de árboles es normalmente muy parecida a la variación en las plantaciones comunes y los bosques naturales.
  - Con el tiempo, puede haber una disminución de variación genética en las poblaciones mejoradas. Sin embargo, existen estrategias de mejoramiento de largo plazo diseñadas para atenuar la pérdida de variación genética y

evitar, entre otros, el problema de la *depresión endogámica* (Andersson, 1999; Barnes y Simons, 1994; White, 1992).

- La conservación genética es otro objetivo importante de los programas de mejoramiento genético agroforestal.
  - Normalmente, en el mejoramiento genético agroforestal se conserva la variación genética no en bancos de germoplasma “estáticos” sino en los mismos huertos semilleros, ensayos de descendencias y poblaciones de mejoramiento, es decir el mejoramiento es una forma de conservación a través del uso.
- Los objetivos de mejoramiento pueden expresarse como un ideotipo, el cual se define como una visión del árbol ideal para producir un bien o servicio definido. El ideotipo para producir, por ejemplo, leña es muy diferente del ideotipo para producir madera, y por lo tanto los criterios de selección en los dos casos serían muy diferentes (ver ejemplos).

#### 4.3 LA FIJACIÓN DE PRIORIDADES: UNA ETAPA PRELIMINAR ESENCIAL

- Antes de implementar cualquier actividad de mejoramiento genético, es necesario  **fijar prioridades** en función de las características e incluso de las especies que se pretenden mejorar.
- En el caso del mejoramiento industrial, estas son decisiones relativamente fáciles; las empresas por lo general trabajan con determinadas especies y los requerimientos de la industria determinan los criterios de selección. Además, las decisiones pueden ser hechas por un grupo pequeño de personas, ej. el jefe de la sección de investigación o la junta directiva.
- El caso del desarrollo de material para su uso por pequeños productores es distinto. Ellos forman un grupo heterogéneo, con diferentes intereses y prioridades. Antes de iniciar un proceso de mejoramiento genético para o con los pequeños productores, es necesario consultar con ellos.
  - Existe una metodología para fijar prioridades en el mejoramiento y domesticación para o con pequeños productores. Esta metodología fue utilizada por ICRAF en el desarrollo de su programa de domesticación agroforestal en Ucayali y Yurimaguas.

#### 4.4 TIPOS DE FUENTE SEMILLERA MEJORADA

- El **jardín de multiplicación clonal** (JMC) produce **semilla vegetativa**, en forma de estacas que deben ser enraizadas en cámaras de propagación.
  - En sí, la propagación vegetativa no mejora la calidad genética.
  - Normalmente, un JMC es constituido por setos clonados de por lo menos

- 20 árboles genéticamente superiores.
- Se cosechan la semilla vegetativa – las estacas – de los rebrotes que producen los setos al ser cortados cada cierto tiempo.
- Los JMC pueden producir semilla vegetativa de muy alta calidad, frecuentemente 50-100% más productivo que la semilla no mejorada.
- Un **huerto semillero** es comparable a un hato de sementales. Es una plantación de árboles con pedigrí conocido, en la cual cada árbol ha sido seleccionado por la comprobada calidad genética de la semilla que produce.
  - La semilla producida por los huertos semilleros es de muy alta calidad, frecuentemente 10-20% mejor que la semilla común.
- Una **plantación semillera de procedencia conocida (PS-PC)** es una plantación establecida con semilla de la mejor procedencia, manejada para producción de semilla.
  - Una PS-PC es un sistema para utilizar los resultados de los ensayos de procedencias, particularmente de especies exóticas.
  - Una PS-PC puede producir semilla de hasta 100% mejores rendimientos que las fuentes alternativas, dependiendo del grado de superioridad de la mejor procedencia.
  - La importación de semilla de la mejor procedencia (en lugar de establecer una plantación semillera) en cantidad suficiente para satisfacer las necesidades de la reforestación es recomendable cuando no se espera una demanda continua para semilla en años futuros.
- Un **rodal semillero** es un rodal natural o plantación de buena calidad fenotípica (=apariciencia), manejada para la producción de semilla.
 

Un rodal semillero normalmente produce semilla de buena calidad,  $\leq 5\%$  mejor que la semilla común.

  - Se utilizan los rodales semilleros como fuentes interinas mientras se desarrolla semilla de más calidad.
  - **Al utilizar semilla de una fuente conocida, como un rodal semillero, hay seguridad que la semilla no provenga de una fuente mala calidad.**
- Los árboles semilleros son árboles individuales que se designan para la colecta de semilla. Los árboles semilleros tienen la misma función interina de los rodales semilleros. Se utilizan para aquellas especies que tienen una distribución natural esparcida, como muchas especies tropicales.

#### 4.5 JUSTIFICACIÓN Y FACTIBILIDAD DEL MEJORAMIENTO GENÉTICO

- El mejoramiento genético ya es un elemento rutinario en la actividad forestal en todos los países donde hay un sector importante de plantaciones forestales.



- Se han publicado muchos **análisis financieros** del mejoramiento genético forestal que comprueban que constituye una de las inversiones forestales más rentables.
- De la misma manera, el invertir en semilla mejorada casi siempre es una decisión acertada. Un aumento grande en el costo de la semilla agrega poco al costo de establecimiento de las plantaciones, porque el costo de la semilla representa una proporción pequeña del costo total. El valor del aumento en cantidad o calidad del producto, consecuente del uso de la semilla mejorada, es mucho mayor que el costo adicional de la semilla mejorada.
- El mejoramiento genético puede ser una actividad compleja y sofisticada, especialmente en sus etapas avanzadas. Pero también hay técnicas baratas, sencillas y efectivas, especialmente en las etapas iniciales.
  - Los requisitos mínimos para llevar a cabo en un programa simple de mejoramiento genético agroforestal son poco exigentes y dentro del alcance de muchas instituciones.
  - Además de estos requisitos el mejoramiento genético exitoso requiere mucho cuidado, atención en los detalles y dedicación.
- El mejor momento para iniciar un programa de mejoramiento genético agroforestal no es “ahora”, sino hace 10 años. El segundo mejor momento es “ahora”.
  - ICRAF, en sociedad con el INIEA y PROSEMA, inició actividades de mejoramiento genético agroforestal hace más de 10 años. Los productos de este programa – semilla seleccionada de bolaina, capirona y pijuayo – ya están llegando a los productores. Hace falta expandir y replicar estas experiencias en el Perú.

## Diseños de cruzamiento

Las secciones restantes de este capítulo sobre ensayos de descendencias buscan explicar los mejores diseños de cruzamiento y de campo para alcanzar los objetivos primarios de los ensayos: estimación de los valores de cruza y de la aptitud combinatoria específica (ACE) que describe el comportamiento de la descendencia de 2 progenitores específicos y el mantenimiento de una base genética suficientemente amplia para selecciones futuras. Los ensayos bien diseñados para cumplir estos objetivos generalmente funcionarán muy bien para planificar los raleos genéticos y estimar la heredabilidad, y proporcionarán una estimación razonablemente buena de la ganancia genética con respecto al testigo, aunque la ganancia estará basada en árboles jóvenes y tendrá las limitaciones asociadas con las parcelas pequeñas.

## Consideraciones en la elección de un diseño de cruzamiento

### **El control de pedigrí**

Una de las consideraciones más importantes en un programa de cruzamiento es si se necesita o no el control del pedigrí (cruzas controladas). Con cruzas controladas, se puede reducir el problema asociado con la depresión endogámica producto de los apareamientos consanguíneos, mediante el control del pedigrí de los padres a cruzar; sin embargo, la craza controlada es generalmente más costosa debido al esfuerzo necesario para realizar las cruzas y porque se evaluará un mayor número de familias que en los sistemas de polinización abierta. El término “familia”: se refiere a un grupo de individuos relacionados, usualmente hermanos. Los tipos comunes de grupos familiares son medio hermanos, hermanos completos, familias de polinización abierta, cruzas de polimezclas y autocruzas. Los términos “cruce” y “familia” se usarán en este documento como sinónimos.

### **Producción de hermanos completos**

Si se va a producir familias de hermanos completos a escala comercial, entonces se requiere de cruzas controladas.

### **Número de cruzas por padre**

En los esquemas de cruzas controladas, existen diferencias considerables en eficiencias entre diseños de cruzamiento en términos del número de cruzas por padre necesario para una buena estimación de los valores de craza.

### **Número de cruzas no relacionadas para un número dado de padres**

Asimismo, existen grandes diferencias en cuanto al número de cruzas no relacionadas para un número dado de padres. Esto es de extrema importancia para controlar los cruzamientos endogámicos en generaciones futuras.

### **Carga y fuerza laboral**

Algunas veces, el mejor diseño de cruzamiento no puede ser implementado debido a la falta de personal y/o experiencia. A menudo se debe buscar una solución intermedia, sin embargo, usualmente existen diseños alternativos que pueden proporcionar una buena estimación del progreso al menos durante un pequeño número de generaciones.

## Diseños de pedigrí controlado

### **Dialelo completo**

Un dialelo completo involucra todas las cruzas posibles entre un grupo de individuos, incluyendo la autopolinización o autocruza. Un dialelo completo proporciona información completa sobre los individuos cruzados: ACE con todos los demás individuos, autocruzas y efectos recíprocos. Los efectos recíprocos ocurren cuando la cruce de AxB y de BxA no son iguales (la primera letra identifica a la madre y la segunda al padre). Esto puede deberse a influencias materiales o a herencia extracromosómica (citoplasmática). Hasta ahora, los efectos recíprocos no han mostrado ser importantes en la mayoría de las poblaciones forestales. Las cruzas recíprocas generalmente se hacen en la mayoría de los programas de cruce, debido al trabajo adicional y a sus pocos beneficios. Además, las autocruzas usualmente no son parte de un esquema de cruce operacional, aunque pueden ser muy importantes en investigación para definir el grado de depresión endogámica de un individuo o una población.

### **Dialelo medio**

Los dialelos medios sin cruzas recíprocas ni autocruzas son bastante comunes en el mejoramiento forestal. Sin embargo, un dialelo medio de todos los padres es usualmente prohibitivo en términos del número de cruces resultantes para evacuación. Un dialelo medio de 200 padres produce 19900 cruces.

### **Dialelo medio desconectado**

Los dialelos medios desconectados a menudo están ilimitados en tamaño a un número suficientemente grande para poder estimar los valores de cruce de los padres. Los estudios han mostrado que cinco a siete cruzas por padre (dialelos medios de 6-8 padres) proporcionan un buen estimado de los valores de cruce, sin producir números inmanejables de cruces para evaluación.

### **Factorial**

En un diseño factorial, un juego de progenitores es cruzado con otro juego en forma factorial. Este diseño proporciona flexibilidad en el sentido de que los primeros árboles que produzcan polen pueden ser usados como progenitores masculinos, y el resto como progenitores femeninos. El polen es usualmente el factor limitante en los primeros intentos de cruzamiento de muchas especies de pino. Lo más comunes una serie de pequeños factoriales de 5x5 o 7x7.

### **Probador**

Otro variante del diseño factorial es el diseño "probador", en el cual un gran número de madres son cruzadas con un pequeño número de padres (por ejemplo, cinco a siete). Las ventajas de este diseño son que los primeros productores de polen pueden ser utilizados para cruzar todas las demás madres y que la

comparación de los valores de cruce es más sencilla, puesto que todas las madres son cruzadas con el mismo grupo de padres. Sin embargo, el limitante principal de este diseño es que el número máximo de cruces no emparentados equivale al número de progenitores masculinos utilizados, el número máximo en un buen diseño sería la mitad del número de progenitores involucrados en el cruzamiento. Los cuatro diseños ilustrados anteriormente producen el máximo número de cruces no emparentados, pero el dialelo media desconectado debe tener un número par de progenitores para lograr este objetivo.

### **Anidado**

En este diseño, los individuos son: cruzados a un grupo distinto de otros individuos en forma anidada. La ventaja es que se puede lograr un buen estimado de los valores de cruce con un número relativamente pequeño de cruces. No produce el máximo número posible de individuos no emparentados.

### **Biparental**

En este diseño, los individuos son agrupados en pares y cruzados entre sí. Para un número limitado de cruces por evaluar, el diseño biparental permite el uso del máximo número de padres para el mantenimiento de una base genética amplia (o, alternativamente, el menor número de cruces para un número dado de padres). No proporciona buen estimado del valor de cruce o de la ACE, puesto que cada progenitor es cruzado únicamente con otro, aunque se puede evaluar un gran número de cruces y seleccionar los mejores para uso operacional. Los **cruces de valor** para propagación comercial **no necesariamente deben de mostrar buena ACG**.

## **Diseños sin control de pedigrí**

### **Polinización abierta**

Lo atractivo de los ensayos de descendencias de polinización abierta son su simplicidad y facilidad. Cuando se ejecuta adecuadamente y la depresión endogámica no es un problema, pueden proporcionar ganancias genéticas excelentes. Las mejores ganancias genéticas se obtienen cuando los árboles seleccionados se establecen juntos y se permite su cruzamiento y la producción de descendencias para evaluación. Cuando se recolecta semilla de polinización abierta de árboles seleccionados que han sido polinizados por árboles no seleccionados, los resultados serán desalentadores. Se obtendrá solo la mitad de la ganancia genética porque solo las madres fueron seleccionadas, no la fuente de polen. Esto es particularmente cierto para árboles seleccionados en rodales naturales y plantaciones, pero puede ser el caso también para árboles seleccionados en ensayos de descendencias, si la semilla es recolectada de estos ensayos antes de los aclareos.

## **Polimezcla**

Se puede utilizar una polimezcla (una mezcla homogénea de polen de varios padres) de los primeros productores de polen para aplicarla a todas las demás madres, y así lograr un cruzamiento más rápido de lo que puede lograrse con una polinización abierta. Sin embargo las polimezclas involucran el trabajo asociado con la polinización controlada, sin los beneficios del control de pedigrí. Además, el número de cruces no emparentados es limitado al número de padres que componen la mezcla, o incluso menor, si existe competencia entre fuentes de polen durante la fertilización puede afectar el comportamiento a largo plazo en el campo y enmascarar el potencial genético real de las familias, que tal vez se hubiesen comportado mejor si hubiesen recibido un buen manejo en el vivero.

La siembra debe planificarse cuidadosamente para que las plántulas estén listas al momento apropiado para la plantación de campo.

## **Diseño de campo**

La evaluación de campo es la fase más cara de un programa de mejoramiento genético. Consecuentemente, es importante que el diseño de campo sea eficiente, al mismo tiempo que permita buena precisión en la estimación de las medias de las familias. Las consideraciones principales son el número de sitios de prueba por familia o grupos de familias, el número de repeticiones en cada sitio y la forma y tamaño de las parcelas dentro de las repeticiones.

### **Número de sitios**

El número de sitios necesarios depende principalmente del grado de interacción familia-sitio (usualmente denominado interacción genotipo - ambiente) o el grado en el cual las familias muestran cambios de rango bajo las diferentes condiciones ambientales presentes en el área donde se llevará a cabo la reforestación. Si se esperan fuertes interacciones genotipo-ambiente, entonces será necesario establecer varios ensayos en los ambientes de interés. En este caso, los ensayos se deberían establecer en áreas representativas que muestran diferencias marcadas en factores como tipo de suelo, elevación, precipitación o latitud.

Si se dan interacciones genotipo-ambiente importantes, entonces existen dos estrategias posibles: a) intentar encontrar un número suficientemente grande de familias que se comporten bien en una variedad de sitios, o b) dividir el área en regiones de mejoramiento y desarrollar poblaciones mejoradas para cada región, las interacciones genotipo-ambiente dentro de cada región deberían ser mínimas.

En el segundo caso, los árboles son seleccionados y las poblaciones mejoradas dentro de cada región. Cuando sea posible, es mejor evitar demasiadas regiones

de mejoramiento debido a la carga adicional de trabajo que esto involucra, tanto en el número de cruces como en la evaluación. Se tiene que tener cuidado en la interpretación de las interacciones estadísticamente significativas que se deben a cambios en la varianza entre sitios. Tales interacciones no tienen importancia, a diferencia de aquellas que se caracterizan por cambios importantes en rango.

Si las interacciones no parecen ser un problema serio, el número de sitios de prueba por familia puede ser pequeño, aunque siempre es conveniente establecer al menos dos o tres sitios, en caso de que se pierda uno o más ensayos. Otra razón para establecer más de un ensayo por familia es que esto asegura la exposición de las familias a ciertos patógenos que pueden encontrarse en una zona pero tal vez no en otra. Los sitios adicionales también refuerzan los estimados de las medias de las familias, al aumentar el número de individuos que participan en la estimación.

### **Tamaño y forma de las parcelas**

El tipo más deseable de parcela de familia, si no existen otros obstáculos sobre el número de árboles que pueden ser plantados, es una parcela grande y cuadrada, en la cual sólo se evalúan los árboles centrales. Estas parcelas asegurarían que no existe competencia inter-familiar que podría sesgar las comparaciones. Con parcelas pequeñas existe el peligro de que las familias de más rápido crecimiento supriman a las familias de menor crecimiento inicial una vez que se inicie la competencia. Sin embargo cuando se están evaluando varios cientos de familias y cuando la semilla es limitada, las parcelas pequeñas son preferibles para la primera fase de ensayos. Más adelante, cuando hay grandes cantidades de semilla de los huertos semilleros y cuando se ha reducido fuertemente el número de familias de interés, se pueden establecer ensayos de productividad utilizando parcelas más grandes.

El tipo más común de parcela de ensayos de descendencias es la parcela lineal. Se considera que 5-10 árboles por familia es un buen tamaño, en el sentido que permite más repeticiones para una cantidad dada de semilla. Las parcelas en línea permiten la demostración visual de las diferencias entre familias y se facilita el establecimiento en el campo y la marcación de las parcelas.

Probablemente el diseño más preciso es aquel en el cual cada familia está presentada por un solo árbol en cada repetición-parcelas de árboles individuales. Estas parcelas permiten el mayor número de repeticiones para una cantidad dada de semilla. Con frecuencia se requiere un gran número de repeticiones debido a las condiciones altamente variables encontradas en el campo. De este modo, muchas repeticiones garantizan que cada familia tiene individuos creciendo en todas las áreas posibles del ensayo, reduciendo así el sesgo en la estimación de las medias de las familias. Cuando se utilizan únicamente unas

pocas parcelas grandes, ciertas familias pueden caer con mayor frecuencia en áreas con condiciones inusualmente malas o buenas, llevando a estimaciones imprecisas de su verdadero potencial genético.

Las parcelas de árboles individuales tienen tres desventajas principales: 1) la identificación de familias en el campo es difícil, puesto que cada árbol es una parcela y pueden ocurrir confusiones durante la plantación, si no existe un sistema muy bueno para conducir tales ensayos. Se requiere de personal con gran experiencia para establecer parcelas de árboles individuales; 2) es casi imposible mostrar diferencias entre familias durante las visitas demostrativas al campo 3) puede ser casi imposible realizar un análisis de varianza válido, debido al número extremadamente grande de grados de libertad en el modelo ( $n-1$ , el número de árboles en el ensayo menos uno).

### **Número de repeticiones**

El número de repeticiones en un ensayo de descendencias depende del grado de variación inherente al sitio y a la especie, y también del tamaño de la parcela. La mayoría de los sitios de prueba son altamente variables, lo que hace necesario el uso de varias repeticiones para lograr estimados precisos de las medias de familias. El diseño más común es el de bloques completos al azar, donde las parcelas de familias se distribuyen al azar en cada uno de varios bloques (repeticiones).

El número mínimo de repeticiones por sitio para un juego dado de familias debería ser de cinco, pero en la mayoría de los casos, es deseable un número mayor. La tendencia en años recientes ha sido utilizar parcelas más pequeñas, tales como líneas de cinco o seis árboles, plantar en el orden de 40-60 plántulas por familia por sitio (aproximadamente 7-12 repeticiones), cuando se están evaluando muchas familias por primera vez. Donde la mortalidad es alta, se deberían usar más plántulas. Este pequeño número de árboles por familia no es recomendable a menos que se establezcan otros sitios. Varios sitios proporcionarían más árboles para un estimado más preciso de la media.

### **Subjuegos de familias**

Cuando las repeticiones son muy grandes, es difícil mantener la uniformidad dentro de repeticiones. Es altamente aconsejable que las repeticiones sean de 0,25 ha o menos, de manera que no hay mucha variación dentro de ellas. Esta regla limita el número de familias que pueden ser incluidas en un ensayo a 30-50 para la mayoría de los diseños. Los subjuegos de familias son de todas maneras una necesidad, puesto que en la mayoría de los programas se deben evaluar varios cientos de familias, y es imposible incluirlas todas en un solo ensayo. Los subjuegos deberían estar compuestos de grupos de familias que han sido cruzadas entre sí, tales como dos factoriales de 5x5 (50 familias) o tres dialelos medios de seis padres (45 familias).

Se puede establecer más de un juego de familias por sitio, aunque en este caso se deberían mantener separadas en ensayos contiguos. No deberían establecerse juegos diferentes en la misma repetición. El utilizar varios juegos en un sitio simplifica y mejora la eficiencia en el manejo y el establecimiento en el campo.

### **Establecimiento y cuidados en el campo**

En áreas donde existen gradientes reconocibles (donde hay cambios en el ambiente en una cierta dirección, tales como variaciones en topografía o cambios graduales en el suelo a lo largo del sitio), las repeticiones deberían ubicarse perpendicularmente a la gradiente, con las familias corriendo paralelamente a la gradiente. El objetivo primario es minimizar la variación dentro de la repetición y maximizar la variación entre repeticiones. Una variación mínima dentro de repeticiones garantiza que todas las familias están siendo comparadas en un ambiente similar. La orientación paralela de las parcelas de familias asegura que todas las familias tienen miembros a lo largo de la gradiente.

Si no existen gradientes ambientales reconocibles, las repeticiones deberían ser tan cuadradas como sea posible, para minimizar las distancias entre las parcelas de una misma repetición. Las repeticiones no se deberían fraccionar y plantar separadamente.

Algunas veces, sin embargo, las divisiones son necesarias para evitar áreas atípicas, tales como depresiones del terreno. Una forma irregular de las repeticiones es a veces necesaria y beneficiosa.

Todos los ensayos deben tener dos líneas externas de borde para prevenir los efectos de borde. Estos bordes deben plantarse al mismo tiempo que el resto del ensayo y deben recibir el mismo trato; existe la tendencia a tratar los bordes con descuido, lo cual los hace menos efectivos.

Se debería prevenir la mortalidad inusualmente alta mediante irrigación, si es necesario. Es claro que el mejor momento para plantar es durante la época lluviosa, cuando la irrigación no es necesaria, pero es aun más importante no perder recursos genéticos valiosos.

El cuidado que se le brinde a los ensayos de descendencias debería ser tan bueno, o mejor, que el más intensivo de los cuidados que se dan a plantaciones comerciales. Se deberían utilizar prácticas apropiadas de preparación del sitio, fertilización y combate de malezas. Un buen cuidado de los ensayos se traduce en un mejor desarrollo, las selecciones pueden hacerse en menor tiempo y se aumenta la uniformidad. La uniformidad es un objetivo clave en el manejo de los ensayos de descendencias, de manera que las comparaciones entre familias reflejen variaciones genéticas y no variaciones de sitio.



Todos los ensayos deben tener una marcación permanente. Mucha información y materiales se han perdido debido a mapeo e identificación inadecuados en el campo. No hay excusa para tales pérdidas.

## Colección y análisis de datos

Un informe detallado del establecimiento es una prioridad en cualquier ensayo. Es mejor que estos sean formularios que puedan ser llenados fácil y rápidamente, de manera que no haya retrasos prolongados durante los cuales se pueden perder u olvidar detalles. El informe debe mantenerse en un archivo a prueba de fuego y se debe mantener al menos una copia en otro sitio diferente. El informe de establecimiento debe contener todos los detalles sobre los cuidados en vivero, la fecha de establecimiento, información sobre el sitio, mapas detallados y todas las actividades realizadas tales como fertilización y combate de malezas.

Cuando hay que manejar una gran cantidad de datos, es de vital importancia implementar un sistema de base de datos para el manejo ágil y preciso de la información. Se deben definir las características a medir a cada edad, diseñar formularios de colección de datos, establecer procedimientos de edición, confeccionar respaldos de los archivos y definir los programas de análisis de datos. Los datos de las mediciones previas deberían llevarse al campo para compararlos con las mediciones en progreso.

Como mínimo, se debería medir altura y dap. Se puede evaluar rectitud en árboles de tamaño adecuado, lo cual es importante para productos como madera de aserrío. También se debe monitorear la presencia de niveles significativos de ataque de insectos y enfermedades. Los indicadores de mala adaptación son importantes, especialmente para especies exóticas, tales como sinuosidad extrema, alta mortalidad, quebraduras, colas de zorro, ramificación excesiva y susceptibilidad a vientos y sequía.

## 4.6 CÓMO SE HACE EL MEJORAMIENTO GÉNÉTICO: ASPECTOS TÉCNICOS

- Para aprovechar la variación genética entre poblaciones, la herramienta básica es la selección y uso de procedencias superiores. Para una descripción completa de la metodología de este importante componente, véase el artículo por Mesen (1993).

La selección y uso de procedencias superiores tiene cuatro fases esenciales: la obtención de muestras representativas de semilla, el establecimiento y mantenimiento de ensayos de procedencias, el análisis de los resultados y la multiplicación para su uso local de la procedencia o procedencias seleccionadas

(la última etapa puede ser reemplazada por la importación de semilla de mejor procedencia).

La selección de procedencias es especialmente importante en el caso de las especies exóticas, particularmente cuando estas tienen rangos de distribución amplias (ver ejemplos de variación entre procedencias).

En el caso de las especies nativas, la fuente local es la mejor adaptada al ambiente local, y por lo tanto debe ser preferida si no existe otra información. Sin embargo, aunque la adaptación es importante, la procedencia mejor adaptada no es necesariamente la mejor en términos comerciales, porque la naturaleza premia la supervivencia y capacidad reproductiva y no los rasgos comerciales como la tasa de crecimiento y mucho menos la rectitud del fuste o el valor calorífico de la madera. Por lo tanto, la selección de procedencias superiores es de importancia también en el caso de las especies nativas.

La selección de procedencias superiores es importante al principio de un programa de reforestación y al principio de un programa de mejoramiento. No tiene sentido invertir en un programa de mejoramiento genético, para llegar a un punto que se pudo haber logrado con la selección de una mejor procedencia 15 años atrás. Es mejor iniciar con la mejor procedencia.

Para aprovechar la variación genética dentro de poblaciones, el sistema más eficiente es la selección y uso de clones superiores.

35

Un clon es un grupo de organismos genéticamente idénticos. Los agricultores frecuentemente utilizan clones cuando establecen **cercos vivos** por medio de propagación vegetativa.

La clonación depende en la disponibilidad de técnicas de propagación vegetativa. Existen técnicas sencillas y baratas de propagación que funciona bien con la gran mayoría de especies tropicales ensayadas hasta la fecha (Mesen, 1998), por lo cual el uso de técnicas sofisticadas como el cultivo de tejidos no es necesario. Las palmeras constituyen una importante excepción, porque no se han desarrollado todavía técnicas eficientes para su propagación vegetativa.

La primera etapa en la selección y uso de clones superiores es normalmente la selección de árboles “plus” en las plantaciones existentes o rodales naturales. Los árboles “plus” son árboles con un alto grado de superioridad fenotípica.

Posteriormente, se recolecta material vegetativo de cada árbol “plus”. No se recolecte material de la copa, porque al ser enraizado, seguirá creciendo como si continuara siendo parte de la copa: lentamente e incluso en forma horizontal en lugar de vertical (= crecimiento **plagiotrópico**). De ser posible, tale el

árbol “plus”, para cosechar los rebrotes, que son de carácter juvenil. Si no es posible cortar el árbol, a veces es posible estimular la rebrotación del fuste, haciendo cortes diagonales en la corteza. Se enraíza el material colectado en una propagador, y después se establece un **jardín de multiplicación clonal**, con setos de cada clon. De los setos se producen más material juvenil, que se enraíza para el establecimiento de ensayos clonales. Algunas especies no rebrotan. En estos casos, se puede recolectar semilla en lugar de material vegetativo, y después propagar las plántulas germinadas. Pero en este caso se pierde algo de la superioridad del árbol “plus” por que la semilla tiene solo el 50% de carga genética del árbol madre. En los ensayos clonales, se identifican los mejores clones. Posteriormente, se reemplazan los clones inferiores en el jardín de multiplicación con setos nuevos de los clones superiores. A partir de este momento, el jardín produce plantones superiores para el establecimiento de plantaciones superiores.

Es importante utilizar mezclas o mosaicos de clones en las plantaciones. Las plantaciones clonales de este tipo tienen suficiente diversidad genética para resistir los ataques de plagas y enfermedades e incluso pueden ser más variables que los rodales naturales.

- Existe otra opción más tradicional para aprovechar la variación genética dentro de poblaciones: **los huertos semilleros**.

Un huerto semillero es una plantación de árboles en la cual cada árbol ha sido seleccionado por su alta calidad genética comprobada. La calidad se comprueba utilizando los ensayos de descendencias.

La primera etapa en el establecimiento de un huerto semillero es la selección de árboles “plus”. Se colecta semilla de cada árbol “plus”. Después, manteniéndose separada la semilla de cada árbol plus, se establecen ensayos de descendencias (=ensayos de progenies). Al comparar el comportamiento de las diferentes descendencias o “familias”, se puede saber la calidad genética de los árboles “plus”.

Posteriormente, se convierte uno o más de los ensayos de descendencias en huertos semilleros. Para convertir un ensayo de descendencias en huerto semillero, se eliminan todas las familias excepto las 20-25 mejores, y además se eliminan los peores árboles en las mejores familias. Antes de la eliminación de las peores familias un ensayo de descendencias, es un huerto semillero no comprobado. Su superioridad genética proviene de la selección original de árboles plus.

Otro tipo de huerto semillero, el **huerto semillero injertado** (también conocido como “huerto semillero clonal” o simplemente “huerto clonal”), se establece así: además de colectar semilla de los árboles “plus” para los ensayos de

descendencias, también se recolecta material vegetativo maduro, de la copa, para después hacer injertos. Los injertos sirven para hacer clones de los árboles plus. Estos clones se plantan en el huerto semillero. Se eliminan los clones inferiores con base de los resultados de los ensayos de descendencias (al igual que se hace con las familias inferiores en el caso del otro tipo de huerto). A diferencia de la selección de clones superiores, en este caso **conviene** que el material vegetativo sea adulto, porque 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 para la producción de semilla mejorada. En los huertos semilleros injertados la ganancia genética en la fase de selección de árboles plus es dos veces mayor que en el caso de los huertos semilleros de plantones, pero después no hay oportunidad para seleccionar dentro de las familias, porque el huerto consiste de clones, no de familias.

- El mejoramiento genético es un proceso acumulativo, que debe continuar a lo largo de las generaciones futuras de árboles. Estos programas de largo plazo se basan en el mejoramiento continuo de la población de mejoramiento, con base en ensayos de descendencias.

Existen estrategias de mejoramiento de largo plazo, como las sublíneas, las poblaciones múltiples y otras, que permite el progreso a largo plazo sin incurrir en una pérdida inaceptable de variación genética.

Los rodales semilleros son muy diferentes de los huertos rodales. Son rodales naturales o plantaciones comunes, que se han identificado como fuentes interinas de semillas, con base en su calidad fenotípica. Después de encontrar un rodal de buena calidad, se eliminan los individuos de calidad inferior.

Los rodales semilleros sirven para abastecer semilla de calidad aceptable de fuentes conocidas, mientras se desarrolla fuentes de mayor calidad.

## 4.7 PARÁMETROS GENÉTICOS

### Parámetros genéticos cuantitativos

Los más importantes parámetros genéticos son la varianza genética aditiva, la varianza genética de dominancia, la heredabilidad y la correlación genotípica aditiva, además podemos incluir al coeficiente de variación genética aditiva (CVa). Este último permite la comparación directa entre diferentes características y en diferentes especies.

### **Varianza genética aditiva y de dominancia**

La varianza genética aditiva es equivalente a la varianza de los **valores de cruza**. El valor de cruza es un concepto simple. Imagine un gen A con dos alelos A1 y A2. Asume que este gen es el único que afecta a la altura de los árboles (una supuesta muy artificial, pero válido por fines de explicación), y que hay 36 árboles A1A1, con una altura promedio de 20 m, 16 A2A2 con altura promedio de 16 m y 48 A1A2 con altura de 18 m. Lógicamente, la población tiene una media ponderada de altura de 18,4 m. En este caso, el valor de cruza de un árbol A1A1 es +1.6 m, o sea el valor de su desviación del promedio poblacional (20 – 18.4). Similarmente, los valores de cruza de los árboles A2A2 son -2,4 m y de los A1A2 -0.4 m. La varianza de estos tres valores es la suma de sus desvíos cuadráticos por sus frecuencias, o sea:

$$(1.6^2)(0,36)+(-0.4^2)(0,48)+(-2,4^2)(0,16) = 1,92 = \text{varianza de los valores de cruza} \\ = \text{varianza genética aditiva } (V_A \text{ ó } \sigma^2A).$$

Se llama valor de cruza porque expresa el efecto que tendría el genotipo sobre la próxima generación al ser cruzado aleatoriamente con los otros árboles. Si pasara esto, un árbol A1A1 produciría progenies de dos tipos: A1A1 y A1A2. Las proporciones dependerían de las frecuencias alélicas en el polen producido por la población. Como las frecuencias genotípicas son 0,36 (A1A1), 0,48(A1A2) y 0,16(A2A2), ya sabemos que las frecuencias alélicas son 0,6(A1) y 0,4(A2). Por lo tanto, se esperaría que un árbol A1A1 produciría progenies en las proporciones siguientes: 60% A1A1 y 40% A1A2. Por lo tanto, el valor promedio de la progenie de un árbol A1A1 sería: (0,6)(20)+(0,4)(18) = 7.2+12=19,2. Este valor es 0,8 m superior al promedio. El valor de cruza es 1,6, o sea dos veces esta desviación, porque sólo la mitad de los alelos en la progenie proviene del árbol A1A1 en cuestión.

En el ejemplo anterior, el heterocigota es intermedio a las dos homocigotas. En realidad, este supuesto no es tan realista, y puede ser que el heterocigota es igual a uno de los homocigotas (dominancia total) o entre el punto intermedio y el valor de uno de los heterocigotas (dominancia parcial). Por ejemplo, digamos que el heterocigota tenga valor de 19,0 m en lugar de 18 m. Asumiendo las mismas proporciones, ahora el promedio de la población sería:

$$(0,36)20 + (0,48)19 + (0,16)(16) = 18,88\text{m}$$

Nuevamente, se pueden calcular los valores de cruza con base en los valores promedios de las progenies. Al igual que el ejemplo anterior, un árbol A1A1 producirá progenies A1A1 y A1A2 en proporciones 60%:40%, pero esta vez el valor promedio de la progenie es: (0,6)(20)+(0,4)19) = 19,6 y el valor de cruza es: 2(19,6-18,88) = +1,44 m

Un árbol de genotipo A1A2 produciría progenies con las siguientes proporciones:

Genotipo	Proporción
A1A1	$(0,5)(0,6)=0,3$
A1A2	$(0,5)(0,6)+(0,5)(0,4)=0,5$
A2A2	$(0,5)(0,4)=0,2$

Por lo tanto, el valor promedio de las progenies de un árbol A1A2 sería:

$$(20)(0,3) + (19)(0,5) + (16)(0,2) = 18,7$$

Por lo tanto, el valor de cruce es:  $2(18,7-18,88) = -0,36$ .

Finalmente, el valor promedio esperado de las progenies de un árbol A2A2 sería:  $(0,6)(19) + (0,4)(16) = 17,8$ , y el valor de cruce sería:

$$2(17,8-18,88) = -2,16.$$

En este caso, la varianza de los valores de cruce o varianza genética aditiva es:

$$(1,44^2)0,36 + (-0,36^2)0,48 + (-2,16^2)(0,16) = 1,555.$$

Las diferencias entre los respectivos valores genotípicos y los valores de cruce se conocen como las desviaciones de dominancia:

Genotipo	Valor genotípico total	Valor de cruce	Desviación de dominancia
A1A1	+1,12	+1,44	-0,32
A1A2	+0,12	-0,36	0,48
A2A2	-2,88	-2,16	0,72

También se pueden calcular la varianza genotípica total y la varianza genotípica de dominancia:

$$V_G \text{ ó } \sigma_G^2 = (1,12^2)0,36 + (0,12^2)(0,48) + (-2,88^2)(0,16) = 1,786$$

$$V_D \text{ ó } \sigma_D^2 = (-0,32^2)0,36 + (0,48^2)(0,48) + (-0,72^2)(0,16) = 0,23.$$

Recordando que  $V_A=1,56$ , podemos ver que  $V_G = V_A + V_D$ :

$$V_G = 1,79 = 1,56 + 0,23.$$

El valor de cruce expresa el valor esperado de un individuo, o sea su efecto cuando se cruce con muchos otros individuos. Por lo tanto, la varianza aditiva es la parte de la varianza genética que se puede aprovechar más fácilmente en el mejoramiento genético. Cuando hay dominancia, la mejor manera de aprovechar el valor genotípico total es utilizando la clonación.

Es importante recordar que, en realidad, las características como la altura son controladas no por un gen, sino por decenas o más, por lo cual el valor de cruza de un individuo y la varianza genética depende en el efecto conjunto de muchos loci.

### ***Estimación de la varianza genotípica aditiva***

Las varianza genética aditiva no es solamente un concepto teórico. Se puede estimar fácilmente en un ensayo de progenies. Cuando los individuos comparten los mismos alelos, lógicamente tienden a tener valores de cruza más parecidos. Los parientes cercanos comparten más alelos que los árboles no emparentados. La teoría de la genética cuantitativa nos permite utilizar la similitud entre parientes para estimar la varianza genotípica aditiva. Específicamente:

$$V_{MH} = 0,25V_A,$$

Donde  $V_{MH}$  = componente de varianza de medios-hermanos en un ensayo de progenies.

Es decir, en un ensayo de progenies de medio-hermanos, después de estimar el componente de varianza para una característica determinada (a través del análisis de varianza), se puede estimar la varianza genotípica aditiva multiplicando este por cuatro.

40

También se puede calcular una estimación del coeficiente de variación genotípica aditiva:

$$CVAG = \frac{\sqrt{V_A}}{\bar{x}}$$

Donde  $\bar{x}$  es el promedio de la población.

En general, los CVAG para la altura y diámetro de árboles forestales tienen valores entre 5 y 15%, mientras (tal vez por su relación cuadrática con el diámetro) tiene valores más altos (entre 10 y 40%). La rectitud tiende a tener valores mayores que la altura y diámetro (5-20%), mientras la densidad de la madera normalmente tiene valores más bajos (<10%) (Cornelius, 2004).

La varianza genotípica total se puede medir en un ensayo clonal. Es posible también medir la varianza genética de dominancia, pero requiere un ensayo de progenies más complejo, en el cual las progenies provienen de cruces controlados.

### **La heredabilidad**

En realidad, las características no son afectadas solo por los genes, sino también por el medioambiente. Como consecuencia, la variación que se ve en el bosque

(la varianza fenotípica tiene dos componentes):

$$V_F = V_G + V_M$$

Donde  $V_F$  =varianza fenotípica,  $V_G$  =varianza genotípica,  $V_M$  =varianza medioambiental.

Recordando que la varianza genotípica tiene dos componentes, esta misma ecuación se puede escribir:

$$V_F = V_A + V_{NA} + V_{MI}$$

Donde  $V_A$  es la la varianza genotípica aditiva,  $V_{NA}$  es la varianza genotípica no aditiva (en realidad esta tiene dos componentes – la varianza de dominancia que se mencionó anteriormente, más la varianza epistática, que se debe a las interacciones entre loci).

La heredabilidad es la proporción de la varianza fenotípica que es de origen genotípico aditivo:

$$h^2 = \frac{V_A}{V_a + V_{NA} + V_M}$$

Se utiliza el símbolo  $h^2$  porque la heredabilidad es un tipo de coeficiente de determinación: la proporción de la variación fenotípica explicada por los efectos genéticos aditivos. La raíz cuadrada de la heredabilidad  $h$  , es la correlación entre fenotipo y valor de cruce.

41

Al igual que la varianza genotípica aditiva, la heredabilidad se puede estimar en un ensayo de progenies:

$$h^2 = \frac{4V_{MH}}{V_M + V_{BF} + V_E}$$

Donde  $V_{BF}$  es la varianza de la interacción entre bloques y familias y  $V_E$  es la varianza residual.

Normalmente, la heredabilidad para las características comerciales en los árboles forestales tiene valores entre 0,1 y 0,3. La densidad de la madera es una excepción, ya que normalmente tiene valores más altos (>0,3) (Cornelius, 1994).

Este tipo de heredabilidad se conoce normalmente como la heredabilidad en el sentido estricto o  $h^2$ . También hay otros tipos de heredabilidad. La heredabilidad en sentido amplio ( $H$  ó  $h^2_{bs}$ ) tiene la varianza genotípica total en el numerador, en lugar de sólo la varianza aditiva. Se puede estimar en un ensayo clonal. También se puede calcular heredabilidades de los valores promedios (como



los promedios de familias o clones). Estas heredabilidades suelen ser mucho más altas, porque, como vimos al principio de esta sección, los promedios de las familias (clones) estiman los valores genotípicos aditivos (totales).

### La correlación genotípica

La correlación aditiva genotípica es un tipo especial de coeficiente de correlación, que mide el grado en el cual dos características (ej. Densidad y altura) son controladas por los mismos genes. Se puede estimar también en un ensayo de progenies (ver Williams et al., 2002).

### Ejemplos de variación genética intrapoblacional

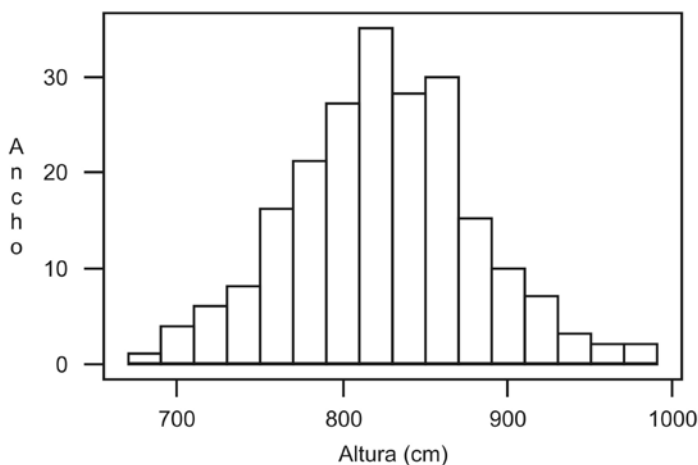
#### Ejemplo 1: *Eucalyptus deglupta* en Costa Rica (Cornelius et al., 1995)

Cuadro de los incrementos en altura entre los 11 y 16 meses de 52 progenies de polinización abierta en tres sitios en Costa Rica (se muestra únicamente las tres peores y tres mejores progenie)

Familia	Incremento en altura (cm)
27	165
106	162
41	156
49	89
108	89
10	84

#### Ejemplo 2: Bolaina blanca, Ucayali.

Distribución de frecuencias de promedios de alturas totales por familia para Guazuma crinita en plantación es de 24 meses, Ucayali, Perú (ICRAF, datos sin publicar)



## **Ejemplos de variación genética interpoblacional**

Extracto de Corea *et al.*, 1992:

El primer y, probablemente, más importante paso de un programa de reforestación es la selección correcta de la especie y de la procedencia dentro de la especie. Sin embargo, esta decisión necesita una base científica y generalmente no se cuenta con la información suficiente.

Reconociendo esta necesidad, el Proyecto Mejoramiento Genético Forestal del CATIE (PMGF) inició en 1977 el establecimiento de una gran cantidad (más de 50 ensayos a la fecha) de ensayos de procedencias con 16 especies.

Las especies incluidas fueron seleccionadas con base en los resultados de ensayos con más de 100 especies exóticas y nativas establecidos por el CATIE, la DGF y la OET en varias partes del país (1, 2, 3).

Hasta la fecha los resultados más importantes por especie son las siguientes:

### ***Acacia mangium***

En un ensayo con 14 procedencias establecido en Santa Clara de San Carlos se encontró a los 4 años de edad que las procedencias más productivas son Abergowrie (CSR13242) y Claudie River (CSR13229) de Queensland, Australia, junto con la procedencia West of Morehead (CSR13459) de Papúa Nueva Guinea. La diferencia en producción de volumen con corteza entre la procedencia Abergowrie y el promedio del resto de las procedencias es de 103% (nota de edición: el resultado de 103% se explica tomando como base el promedio de las repeticiones evaluadas, sin incluir la procedencia de mejor comportamiento que en este caso es la de Abergowrie).

### ***Cordia alliodora***

De acuerdo a dos ensayos de procedencias establecidos en Turrialba se han identificado a los 3 años de edad como procedencias sobresalientes las procedencias San Francisco (K1532077) de Honduras y Florencia de San Carlos, Costa Rica. Las diferencias en volumen entre estas procedencias y el promedio de las procedencias restantes es de 139% y 115 %, respectivamente.

### ***Gmelina arborea***

En un ensayo con 9 procedencias (7 nativas y 2 derivadas) establecido en Javillos de Turrialba (500 msnm) se encontró a los 3 años de edad que las procedencias derivadas Jari (72-14) Brasil y Manila (BLSF1018) Siquirres, Costa Rica, son las más productivas. Las diferencias en producción de volumen entre estas procedencias y el promedio de las procedencias restantes es de 47 % y 41 %, respectivamente”.

## 4.8 GANANCIAS GENÉTICAS EN ESPECIES FORESTALES

La ganancia genética es la diferencia observada entre la población seleccionada y la población sin selección. Normalmente esta ganancia se calcula para una característica cuantitativa determinada, por ejemplo diámetro, altura total o volumen. Existen muchas formas de calcular la ganancia genética, en árboles forestales normalmente ésta se calcula mediante la estimación del promedio de una característica (ej. diámetro a la altura del pecho) de 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 árboles seleccionados) alcanzará, suponiendo el mismo manejo y las mismas características ambientales.

## 4.9 LOS SISTEMAS AGROFORESTALES

Hay muchos tipos de sistema y práctica agroforestal. Entre los sistemas utilizados en el Perú figuran los siguientes:

- Las huertas familiares;
- Las plantaciones forestales en chacras pequeñas;
- Los sistemas multiestratos (incluyendo, por ejemplo, café o cacao con árboles para sombra y otros productos);
- Los cercos vivos.

Es importante no asociar el término “agroforestería” con uno sólo tipo de sistema, como el multiestrato. El Central Mundial de Agroforestería (ICRAF) define la agroforestería como:

“Una práctica dinámica de manejo de los recursos naturales, basada en la ecología, que, a través de la integración de los árboles en las chacras y en el paisaje agrícola, diversifica la producción para lograr beneficios sociales, económicos y ambientales (ICRAF, 2000).

## 4.10 VARIACIÓN GENÉTICA EN POBLACIONES MEJORADAS

Jones et al. (2006) describieron la variación genética en una población mejorada de *Eucalyptus globulus*, derivado de selecciones de primera generación del programa nacional de mejoramiento, y la variación en una muestra de árboles del bosque natural. Los valores de diversidad génica ( $H_g$ ) en los dos casos eran parecidos. Sin embargo, se había perdido algunos alelos raros como consecuencia de la selección.

El-Kassaby (2000), en un tratamiento extenso del tema, presenta comparaciones en el porcentaje de loci polimórficos, el número de alelos por locus y  $H_g$ .

de huertos semilleros y poblaciones naturales de 5 especies de coníferas. En muchos casos, las poblaciones mejoradas presentan mayor variación, principalmente porque reúnen individuos de varias poblaciones.

#### **4.11 PRIORIZACIÓN DE ESPECIES EN LA DOMESTICACIÓN Y MEJORAMIENTO**

A continuación, se reproduce, parte del artículo siguiente: Sotelo Montes, C.; Weber, J.C. 1997. Priorización de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la Selva Baja del Perú. *Agroforestería en las Américas* 4(14): 12 – 17

##### **Introducción**

Antes de iniciar un extensivo programa de investigación agroforestal se debe hacer la priorización de especies. Esta priorización debería considerar las necesidades presentes y futuras de los agricultores, las especies arbóreas que satisfacen sus necesidades, características biológicas y atributos en la investigación de estas especies, así como el presente y futuro mercado disponible para los agricultores. En este artículo se presenta un resumen de la metodología de una priorización de especies arbóreas conducida en la selva baja del Perú y un análisis de los resultados obtenidos. Los principales sitios de investigación del Centro de Investigación de Agroforestería (ICRAF) en el Perú, están localizados en tres zonas de la selva baja: Yurimaguas, Pucallpa e Iquitos. En colaboración con institutos nacionales, universidades y organismos no gubernamentales, se identificaron sistemas agroforestales prioritarios para la selva baja peruana: Sistemas multiestratos, sistemas silvopastoriles, y barbechos mejorados (de corto y largo plazo). En consecuencia las especies que se prioricen deben ser fácilmente aplicables a estos sistemas.

##### **Metodología**

La metodología de la priorización efectuada se basó en un proceso desarrollado por ICRAF y el Servicio Internacional para Investigación Agrícola Nacional (ISNAR) (Franzel et al. 1996), con algunas modificaciones para hacerla más aplicable a las condiciones regionales. En la primera etapa, se priorizaron las zonas de Yurimaguas, Pucallpa e Iquitos para el estudio, e identificaron como clientes, a los agricultores de bajos recursos que deforestan el bosque para realizar actividades agrícolas y pecuarias.

En la segunda etapa se efectuó la evaluación de las necesidades de los clientes por árboles. Se encuestaron a 20 agricultores de Yurimaguas, 49 de Pucallpa, y 64 de Iquitos, sobre su preferencia por especies arbóreas, los productos y servicios que proveen y características para mejorar. Primero, cada agricultor seleccionó las 15 especies más usadas en su terreno. Después, el agricultor

seleccionó 10 de estas especies como prioridad y las ordeno por su importancia del 1 al 10. Seguidamente se asignaron los valores a cada una de las 10 especies prioritarias, donde la especie que para el agricultor era de importancia 1 le correspondía el valor máximo de 10 y así sucesivamente con cada una de las especies por cada agricultor, hasta que la última con importancia le correspondía el valor mínimo de 1. Después se sumaron estos valores y se dividieron entre el número de agricultores encuestados en cada zona, para tener su valor promedio. Las especies con valor promedio máximo asignado recibieron 100% de importancia relativa en la zona y las otras, recibieron importancia relativa en relación con este valor máximo.

Se determino el porcentaje de agricultores encuestados en cada zona que uso cada especie, (a) de la lista de las 15 más usadas y (b) de la lista de 10 especies priorizadas. Para estos cálculos iniciales y las siguientes etapas se tomaron como ejemplo la especie pijuayo (*Bactris gasipaes*). En la zona de Yurimaguas el valor promedio asignado para pijuayo fue 0.05, teniendo en cuenta que el valor máximo que presenta una de estas especies es de 4.75, entonces la importancia relativa del agricultor para pijuayo fue de 64%. El porcentaje de agricultores que usan esta especie fue de 75% (15 de los 20 agricultores) y el porcentaje de agricultores que la mencionaron dentro de las diez especies prioritarias fue 50% - 10 de los 20 agricultores (Cuadro 1).

En la tercera etapa se evaluaron las especies priorizadas por los agricultores en cada zona. Empleando la encuesta sobre los productos y servicios de las especies priorizadas y combinando encuestas de investigadores, extensionistas, expertos en mercado, etc., se identificaron las especies prioritarias (10 en Yurimaguas, 10 en Pucallpa y 13 en Iquitos; 23 en total en las tres zonas) y se determino la capacidad de potencial de cada especie prioritaria en su zona, como fuente del producto (valores de 1, 2 y 3 indicando potencial bajo, medio y alto, respectivamente).

En la cuarta etapa, se priorizaron los usos de los árboles y, al mismo tiempo, las especies por los usos en cada zona. Se preparo un cuadro con doble entrada de producto/servicio versus especie, indicando peso y puntaje por cada especie. El peso considera el potencial de la especie en relación con su posible uso (valores 0, 1, 2 y 3, indicando nulo, bajo, medio y alto respectivamente). El puntaje se refiere al potencial que tiene la especie como fuente proveedora del producto/servicio en calificación. Por ejemplo, si el pijuayo tiene necesidad de ser usado en cercos, tiene peso 2, sin embargo, las propiedades de esta especie no son muy buenas para este uso, por consiguiente tiene puntaje 1. Después se calculo el puntaje total por cada especie y su uso, sumando la multiplicación de cada peso por el puntaje total relativo por cada especie y uso, haciendo el máximo puntaje total igual a 100% con los demás puntajes totales expresados como una fracción porcentual de este máximo.

**Cuadro 1.** Especies priorizada para investigación agroforestal en las tres zonas y Selva Baja.

	Botanical name (Vernacular name)	Plant family	Product/services	Relative importance			% of farmers			Weighted relative importance		
				Y	P	I	Y	P	I	Y	P	I
1	<i>Bactris gasipaes</i> (Pijuayo)	Arecaceae	Alimento, madera, cercas, fibra	64	33	100	75	20	67	100	100	100
2	<i>Cedrelinga catenaeformis</i> (Tornillo)	Leguminosae	Madera, sombra energía	35	15	53	30	10	34	82	88	79
3	<i>Cedrela odorata</i> (Cedro)	Meliaceae	Madera, medicina, energía sombra	47	97	49	70	49	38	83	85	81
4	<i>Inga edulis</i> (Guaba)	Leguminosae	Sombra, energía alimento, cercas, madera	33	37	95	70	36	67	*	89	96
5	<i>Calycophyllum spruceanum</i> (Capirona)	Rubiaceae	Medicina	75	100	21	45	55	14	99	92	67
6	<i>Guazuma crinita</i> (Bolaína Blanca)	Sterculiaceae	Madera, energía, cercas	34	77	4	55	42	3	91	98	*
7	<i>Mauritia flexuosa</i> (Aguaje)	Arecaceae	Maderas, cerca, sombras	22	32	40	25	14	31	*	84	85
8	<i>Phytalephas macrocarpa</i> (Yarina)	Arecaceae	Alimento, energía, fibra, madera	77	*	54	75	*	31	74	*	63
9	<i>Bertholletia excelsa</i> (Castaña)	Lecythidaceae	Fibra, alimento, madera	*	*	7	*	*	6	*	*	79
10	<i>Poraqueiba sericea</i> (Umarí)	Icacinaceae	Alimento, energía madera,	4	13	51	15	8	27	*	*	84
11	<i>Pouteria caimito</i> (Caimito)	Sapotaceae	Energía, alimento, madera	5	45	75	25	36	55	*	*	85
12	<i>Tabebuia serratifolia</i> (Tahuari)	Bignoniaceae	Alimento, energiam madera, medicina	9	56	*	25	20	*	*	80	37
13	<i>Spondias mombin</i> (Ubos)	Anacardiaceae	Madera, medicina	*	5	12	*	6	13	*	*	72
14	<i>Ficus antherimintica</i> (Oje)	Moraceae	Cercas, alimento	40	9	3	90	10	8	73	*	32
15	<i>Sheelea</i> spp. (Shebon)	Arecaceae	Medicina, sombra	13	44	26	30	18	17	*	78	*
16	<i>Euterpe precatoria</i> (Huasai)	Arecaceae	Fibra, alimento	13	1	27	10	2	31	*	*	72
17	<i>Pollatesta discolor</i> (Yanavara)	Asteraceae	Medicine, alimento, madera, fibra, cercas	10	*	32	75	*	20	69	*	*
18	<i>Croton matourensis</i> (Ciprana)	Euphorbiaceae	Madera, energía, cercas	0	*	*	70	*	*	65	*	*
19	<i>Caryodaphnopsis foste.</i> <i>Ocotea</i> spp. (Moena)	Lauraceae	Madera, energía	77	92	*	*	37	*	*	63	*
20	<i>Lepidocaryum Tessmannii</i> (Irapay)	Arecaceae	Madera, energía	*	*	53	5	*	34	*	*	61
21	<i>Minguartia guianenses</i> (Huacapú)	Oleaceae	Fibra, madera	5	3	89	5	2	42	*	*	59
22	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Anacaspi)	Leguminosae	Madera, energía, medicina	5	*	*	60	*	*	58	*	*
23	<i>Heteropsis jennmanii</i> (Tamshi)	Arecaceae	Madera, energía	43	*	69	*	*	48	*	*	39

\* Los agricultores encuestados no utilizan la especie.

Y = Yurimaguas, P = Pucallpa, I= Iquitos , SB = Selva Baja

En la quinta etapa se priorizaron las especies en cada zona y en la selva baja en general, con base en los resultados de las etapas previas y otras consideraciones. Se preparo un cuadro que recoge los aspectos referentes a la importancia relativa de cada especie asignada por los agricultores e investigadores, la facilidad que ofrece cada especie para realizar la investigación (disponibilidad de germoplasma, información previa, variabilidad genética, tiempo al inicio de producción, posible impacto técnico), la posibilidad de adopción por los agricultores (facilidad de establecimiento, periodo al inicio de la cosecha, potencial comercial uso con diferentes tecnologías, adaptabilidad entre regiones y entre grupos socioeconómicos) y algunos modificadores por características especiales de la especie (posibilidad de uso equitativo, conservación de los recursos básicos, distribución regional). Se calculó como en las etapas anteriores, los puntajes totales relativos para las especies en cada zona (Cuadro 1). Después, se seleccionaron 15 especies que tenían altos puntajes totales relativos entre por lo menos dos de las tres razones. Se calcularon los puntajes totales relativos de esas especies en la selva baja en general (Cuadro 1), incorporando los resultados de la priorización de los usos (etapa 4) y las especies en cada zona (etapa 5). Por último se seleccionaron las cinco especies prioritarias para investigación en la selva baja según su mayor puntaje total relativo y su fácil aplicabilidad a un sistema agroforestal.

## Resultados y discusion

Los agricultores seleccionaron 58 especies arbóreas como prioritarias en Yurimaguas, 62 en Pucallpa y 100 en Iquitos. El coeficiente de especies seleccionadas por número de agricultores encuestados es 2.9 en Yurimaguas, 1.3 en Pucallpa y 1.6 en Iquitos, por lo que se infiere que los agricultores de Yurimaguas seleccionaron relativamente más especies que los agricultores de las otras dos zonas. Muy pocas especies fueron seleccionadas por la mayoría de agricultores de una zona, solamente 15% de las especies en Yurimaguas y menos del 2% en Pucallpa e Iquitos fueron seleccionadas por mas de la mitad de agricultores encuestados en su zona. Estos resultados pueden reflejar mas conocimiento sobre árboles por agricultores en Yurimaguas que en Pucallpa e Iquitos. Por otro lado, son muy pocas las especies seleccionadas por agricultores que son investigadas por las instituciones nacionales (menos de 20 especies).

La combinación de respuestas de todos los agricultores incluye 155 especies arbóreas seleccionadas como prioritarias, las cuales representan 40 familias. Las familias más utilizadas (porcentaje del total de especies en paréntesis) son: Fabaceae (13%); Arecaceae (9%); Annonaceae y Euphobiaceae (5%); Apocynaceae, Lauraceae, Moraceae y Rubiceae (4%); Anacardiaceae, Bombacaceae, Clusiaceae y Myrtaceae (2%); Araceae, Asteraceae, Flacourtiaceae, Myrustucaceae, Sapindaceae y Sapotaceae (1%). Considerando la biodiversidad en la Amazonia Peruana, no es sorprendente que los agricultores valoren muchas especies.

Existe una marcada preferencia entre los agricultores por especies que brindan madera, siendo seguidas por las que brindan energía y alimento. La mayoría de las especies seleccionadas en las tres zonas, especialmente en Iquitos, provee de productos de madera. En Yurimaguas hay una mayor preferencia por especies que brindan energía (leña y carbón) para el consumo en vivienda, panaderías y fabricas de ladrillos debido a que en esta zona existe menos fuentes alternativas de energía. Los agricultores en Pucallpa e Iquitos tienen mayor preferencia por los productos no maderables de las especies arbóreas, como los alimentos (frutos, aceite, palmito condimentos y larvas comestibles desarrolladas en algunos árboles como hospederos) y medicinas (compuestos alucinógenos, veneno para la pesca, purgativos para ganado, herbicidas, insecticidas, vermífugos, resinas y latex). Mientras que los productos de fibra, parecen ser más importantes para los agricultores en Yurimaguas e Iquitos que en Pucallpa. También en Yurimaguas hay mayor preferencia por árboles para cercos vivos y sombra que en las otras dos zonas.

En las tres zonas de la selva baja se seleccionaron 23 especies como prioritarias para investigación agroforestal, las cuales representan a 17 familias (Cuadro 1). Además, los valores determinados en su importancia relativa, porcentaje de agricultores que usan la especie, y puntaje total relativo son muy variados en cada una de las zonas. Así por ejemplo, en Iquitos el pijuayo tiene mayor importancia relativa que las otras dos zonas, sin embargo, el porcentaje de agricultores que lo usan es mayor en Yurimaguas. Se seleccionaron cinco especies con alto puntaje total relativo en la selva baja. Sin embargo, considerando que tienen que ser especies fácilmente aplicables a los sistemas agroforestales, se retiró de este grupo a la *Cedrela odorata* (cedro), por tener problemas en su establecimiento con infestación de plagas y enfermedades, situación que todavía no ha sido superada en la actualidad.

En el desarrollo de la metodología de la priorización de especies se observa que no solo es un proceso mecánico, sino que depende mucho de la condición del medio y la idiosincrasia de la gente. La mayoría de los agricultores encuestados son inmigrantes por lo que se estaría hablando de un conocimiento mixto, originado de su adaptabilidad. Sin embargo, el gran número de especies utilizadas por los agricultores confirma la diversidad de especies de las cuales tienen conocimiento. De las tres zonas de estudio, parece que los agricultores de Yurimaguas utilizan mayor número de especies arbóreas que los de Pucallpa e Iquitos. La priorización de los productos está en función de las necesidades del medio, siendo energía para Yurimaguas y madera y alimentos en Pucallpa e Iquitos.

Se seleccionaron cinco especies arbóreas agroforestales de fácil adaptabilidad a un sistema agroforestal: *Bactris gasipaes* (pijuayo), *Cedrelinga catenaeformis* (tornillo), *Inga edulis* (guaba), *Calycophyllum spruceanum* (capirona) y *Guazuma*



*crinita* (Bolaina blanca). Por ejemplo, el pijuayo puede ser instalado junto con un cultivo agrícola y después de dos rotaciones, se podría asociar con una leguminosa forrajera para control de malezas: para fines de producción de palmito su aprovechamiento es al segundo año y para fruto al quinto año. El tornillo puede ser componente en un sistema multiestrato en suelos pobres, o enriquecimiento de barbecho para producción de madera al cuadragésimo año. La guaba se puede sembrar en suelos con alta saturación de aluminio para un barbecho de corta duración, producción de leña y carbón al segundo año y fruto en el tercer año. También la guaba es excelente en los cultivos en callejones por su fijación de nitrógeno y abundante abono verde. La capirona puede instalarse en áreas inundables y la Bolaina en áreas de restinga, para la producción de leña y carbón al cuarto año y postes estructurales de construcción al octavo año.

## Referencia

Franzel, S.m H. Jaenicke y W. Janssen. 1996. Choosing the Right Trees: Setting Priorities for Multipurpose Tree Improvement ISNAR Research Report No 8. The Hague: International Service for National Agricultural Research.

## 4.12 CRITERIOS DE SELECCIÓN EN EL MEJORAMIENTO GENÉTICO FORESTAL

50

Un buen árbol para un fin determinado no necesariamente es un buen árbol para otro fin diferente. Por lo tanto, cuando se selecciona árboles en un programa de mejora, es importante tener muy en cuenta el producto o productos final(es) (Cordero et al, 2003).

## 4.13 RODALES SEMILLEROS

A continuación se presenta parte del texto del siguiente documento: Salazar, R.; Boshier; a Pp.53-68 en Cornelius, Mesén y Corea (eds.). 1993.

### Definición

Un rodal semillero es una plantación o rodal natural, normalmente de una sola especie, que por presentar características deseables en cuanto a crecimiento, forma de los árboles y sanidad, es seleccionado y manejado para la producción de semillas. El manejo al que es sometido 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 más 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 sernilla 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.

## Ganancia genética en rodales semilleros

Es muy 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 sernillero (con una intensidad de selección mayores que 1 en 1000), donde existen mayores probabilidades de que se hayan seleccionado solo los mejores árboles. Comparativamente, por lo tanto, la calidad genética del rodal semillero es menor.

Hay poca información disponible sobre el grado de ganancia genética que se obtiene cuando se utiliza material de rodales semilleros. Por ejemplo, se ha estimado una ganancia de más de 6% en dap y más de 25% en rectitud del fuste (Shelbourne, 1969) con *Pinus radiata* en Nueva Zelandia, más de 25% en dap para *Cupressus lusitanica* en Kenya (Dyson, 1969), y más de 6% en volumen para *P. sylvestris* en Finlandia (Oskarsson, 1971). Cuando hay diferencias genéticas importantes entre rodales (lo cual puede darse cuando los rodales candidatos son de diferentes procedencias), una parte de la ganancia que se obtiene proviene de la selección del rodal, y la otra de la selección de los árboles dentro del rodal (Willan, 1984), de ahí que puede ser muy importante seleccionar los mejores rodales.

## Tipos de rodales semilleros

Tomando el esquema de Jones y Burley (1973), los rodales semilleros se pueden agrupar en tres clases (Keiding, 1975):

1. Rodales semilleros en bosque natural.
2. Rodales semilleros en plantaciones.
3. Rodales semilleros en unidades experimentales.

Es posible utilizar las tres clases en América Central. Así por ejemplo, en la clase I se pueden ubicar rodales de coníferas como *P. caribaea* var. *hondurensis* *P. oocarpa*, *P. tecunumanu* y *latifoliadas* como *Cordia alliodora*, *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala*, *Vochysia spp.* Para algunas latifoliadas tales como *Bombacopsis quinata*, *Cedrela odorata*, *Enterolobium cyclocarpum*, y la mayoría de las especies del bosque húmedo tropical, resulta difícil establecer rodales semilleros del tipo 1, dado que en la mayoría de los casos se presentan en mezclas con otras especies o como árboles aislados.

A la clase 2 pertenecen plantaciones de especies como *Bombacopsis quinata*, *C. alliodora*, *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. deglupta*, *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, especies que han sido probadas y se plantan a escala pequeña o mediana. La clase 2 incluye el rodal semillero de procedencia selecta, una de las modalidades más importantes de rodal semillero. Este tipo de rodal semillero se establece con semilla de una procedencia que ya ha sido identificada como superior en un ensayo de procedencias. Así se aprovechan las grandes diferencias genéticas que pueden existir entre procedencias distintas. Por lo tanto, este tipo de rodal semillero suele dar ganancias genéticas mayores que los otros tipos, donde la ganancia genética depende básicamente en la selección dentro del rodal.

Es importante mencionar que en la región centroamericana es frecuente encontrar plantaciones establecidas a partir de uno o pocos árboles (*E. deglupta* y *E. Camaldulensis*). En estos casos no debe olvidarse que la reducción de la base genética del material que va a ser utilizado para desarrollar plantaciones a mayor escala puede convertirse en un problema grave, debido a los riesgos de depresión endogámica o a los ataques de plagas o enfermedades. Las introducciones deben tener una base genética suficientemente amplia, para permitir selecciones en el futuro. Se recomiendan rodajes semilleros establecidos con semillas provenientes de por lo menos 20 árboles.

Para algunas especies, hasta que no se cuente con plantaciones de dimensiones mayores, es necesario recurrir a la clase c), rodales semilleros en experimentos de campo o parcelas demostrativas. La clase 3 se puede subdividir en parcelas pequeñas de especies y parcelas de procedencias superiores dentro de los ensayos de procedencias. En ambos casos, es importante mencionar que el número final de árboles no sea menor de 25. En el último caso, se deja en el rodal solamente los mejores árboles de las mejores procedencias.

En la sección siguiente se discuten en detalle los procedimientos para desarrollar y manejar rodales semilleros en las condiciones particulares de los países de América Central. Asimismo, se brindan ejemplos para coníferas y latifoliadas maderables y para una especie de porte menor no maderable.

### Identificación y selección de rodales semilleros

Los siguientes son los pasos generales para la formación de rodales semilleros a partir de rodales naturales o plantaciones ya existentes:

- Definición de la importancia de la especie;
- Diagnóstico preliminar de la situación de cada especie de interés para conocer las necesidades actuales y futuras de semilla a nivel nacional y regional; programas actuales y futuros de reforestación y posibilidades de exportación;

- Reconocimiento e inventario de los rodales a nivel nacional o del área de interés.
- Selección entre rodales
- Selección dentro de rodales y manejo.

Los detalles en cada paso pueden variar dependiendo de la especie, el área disponible, la demanda de semilla y la historia de la introducción de la especie. En algunos casos se pueden combinar u omitir pasos, por ejemplo cuando el diagnóstico preliminar revela que en el país hay un solo rodal adecuado. También, en el caso de la modalidad de rodal semillero de procedencia selecta normalmente se omite los primeros tres pasos.

### **Definición de la importancia de la especie**

Como primer paso hay que determinar la importancia de la especie para el país y para la región, así como justificar la necesidad de tener fuentes de sernilla de dicha especie.

### **Diagnostico preliminar de la situación para cada especie**

Es necesario hacer el reconocimiento de la situación para la especie de interés a nivel de país y región. Hay que estratificar por regiones ecológicas. Posteriormente, se debe definir el área ecológica a la cual circunscribir la selección de los rodales. Es necesario buscar información sobre el origen del material, la amplitud de la base genética de dicho material y el comportamiento de las distintas fuentes de semilla en sitios diferentes. Esta información puede provenir de resultados de pruebas de procedencias o diferentes introducciones aisladas generalmente en el país pero también en otras partes del mundo ecológicamente similares. Si existe alguna división clara en el comportamiento de la especie con respecto al clima u otro factor, hay que planificar el establecimiento de rodales semilleros para cada zona.

Es muy importante que cada país u organización de la región haga una estimación a mediano y a largo plazo de las áreas que pretende reforestar con las distintas especies. Es prudente sobreestimar por lo menos en un 30 por ciento 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 varia de de año en año. Es necesario, además, contar con una reserva para los años de baja producción.

Para hacer una estimación de las necesidades de semilla se deben considerar los siguientes aspectos:

- el consumo de semillas en años anteriores recientes;
- la demanda de semillas en el futuro inmediato con base en los programas de plantación;

- determinar si la producción de semillas es constante todos los años, y;
- considerar otras fuentes, aparte de los posibles rodales semilleros, que puedan contribuir a la producción de semillas (importación, huertos semilleros).

Si el reconocimiento revela que el material existente no es de una buena procedencia, se debe obtener sernilla de una procedencia de reconocido buen comportamiento y de un proveedor confiable. Aunque a veces parece alto el costo de semilla, éste es mínimo al compararlo con el costo total involucrado en reforestación. Por ejemplo, 1 kg de *P. caribaea* var *hondurensis* tiene aproximadamente 42.000 semillas viables; si se compra semilla mejorada a \$400/kg, el costo por semilla sería de \$0.0095, es decir, un costo mínimo comparado con el beneficio derivado de su utilización. Es una falsa economía comprar semilla barata tiene mala calidad. **Un pequeño ahorro** en la semilla puede llevar a pérdidas enormes por un aumento en los costos de manejo y una reducción en la productividad de las plantaciones.

A manera de ejemplo de cómo estimar el área que debe ser dedicada a rodales semilleros, a continuación se presentan los cálculos para estimar el área de rodales semilleros necesaria para *C. lusitánica* en Costa Rica, (Quirós, 1988).

La venta anual de semilla de ciprés en Costa Rica es de aproximadamente 37 kg (Salazar y Boshier, 1989). Agregando un factor de sobreestimación de 30%, el total requerido sería de 48 kg. Si se asume una producción anual por árbol de 0,5 kg (Quiros, 1988), y una densidad final de 100 árboles por hectárea, el área de rodales semilleros requerida se puede estimar como sigue:

$$\text{Area} = 48 / (100 \times 0,5) = 0,96 \text{ ha de rodal}$$

Otro criterio para definir el área necesaria de rodales semilleros es basándose en la superficie anual por reforestar. Si se asume como meta una tasa anual de reprobación con ciprés de 2000 ha, y se considera:

Numero de semillas por kg. (S) = 200.000

Proporción de germinación (G) = 0,20;

Proporción de pérdidas por repique (Pr) = 0,15

Proporción de pérdidas en el bancal (Pb) = 0,05

Proporción de selección en el vivero (Sv) 0,10

Proporción de resiembra en el campo (R)=0,10

Densidad de plantación por ha (N) = 1600

Area reforestada /kg de semilla:  $(200.000 \times 0,2) \times (1 - Pr)(1 - Pb)(1 - Sv)(1 - R) \times 1/N = 16,35 \text{ ha/kg.}$

Area de rodales semilleros requerida  $2000/(1635 \times 100 \times 0,5) = 2,45$  ha

Las áreas estimadas por los dos métodos son distintas pues se parte de supuestos diferentes. Sin embargo, cuando se tiene una buena estimación del área a reforestar es preferible usar el segundo método.

Para facilitar la estimación del área que debe ser dedicada a la producción de semillas, el cuadro 5.1 presenta una estimación de la producción de semillas por kilogramo y la fecha aproximada de recolección para algunas especies de importancia para América Central.

### **Reconocimiento e inventario de los rodales**

Es muy importante obtener información sobredetallada sobre las características edáficas y climáticas de sitio, los sitios donde se localizan los rodales candidatos, el origen de la semilla, la calidad reproductiva del rodal, los rasgos fenotípicos cuantitativos y cualitativos de interés, así como el aislamiento, la accesibilidad y el área posible del rodal. Esta información facilitará al final hacer la comparación con otros rodales para priorizar y seleccionar los más aptos, y descartar aquellos que no satisfacen las exigencias mínimas. Esta información también se utiliza para calcular la intensidad de raleo, los cambios en densidad y la calidad fenotípica después de efectuar el raleo.

Como se mencionó anteriormente, si el rodal procede de menos de 20 árboles no es apropiado cómo fuente de semillas y se debe recurrir a la obtención de nuevo material para establecer los rodales semilleros. Si la población procede de poco más de 20 árboles, se puede utilizar para rodales semilleros en forma temporal, pero hay que hacer introducciones nuevas para aumentar la base genética.

Las cercas vivas por lo general no cumplen con los requisitos para ser utilizadas como fuentes de semilla debido a la falta de información sobre su base genética o la probabilidad que ésta sea muy reducida. La deformación del fuste provocada por la forma de propagación y el tipo de manejo en cercas para algunas especies de interés para aserrío (ej.: *Bombacopsis quinata*) no permite tener una buena idea de su calidad fenotípica original.

Idealmente, la selección entre rodales se haría con base en los resultados de ensayos de procedencias, es decir con base genotípica. Sin embargo, normalmente no hay datos disponibles y se tiene que hacer una evaluación fenotípica de cada rodal. A continuación se describen los factores principales que se deben evaluar durante el inventario para la selección de rodales.

## Calidad fenotípica

Con base en las necesidades del producto final, hay que considerar la tasa de crecimiento y la forma del árbol producto (rectitud, ramificación, conicidad, etc.), y seleccionar en el rodal los individuos que reúnan las mejores características. Hay que recordar que en un árbol se presenta una combinación de caracteres distintos. Un rasgo de excelente calidad puede manifestarse junto a otro no tan deseable. Por lo tanto, es necesario evaluar en forma integral la manera en que se combinan las características deseables de un árbol determinado, así como la proporción con que aparecen en el rodal árboles con patrones de combinación adecuados.

No es posible describir un árbol ideal para todas las especies y objetivos de producción. Las especies presentan distintos hábitos de crecimiento y los productos finales también son distintos. Sin embargo, es posible agrupar las especies por hábitos de crecimiento y productos y dar ejemplos de selección para cada grupo se explica a continuación:

- Madera para aserrío: se requieren fustes rectos y cilíndricos, con factor de conicidad bajo, preferiblemente sin bifurcaciones y especialmente sin bifurcaciones bajas, sin gambas y con ramas delgadas y en posición horizontal.
- Postes para electrificación: se requieren fustes rectos cilíndricos, sin bifurcaciones bajas, con buena autopoda y/o con ramas delgadas.
- Postes para cerca y construcción rural: se requieren fustes rectos y preferiblemente sin bifurcaciones bajas. En este caso la ramificación no es tan importante.
  - Producción de leña: la forma del fuste y el sistema de ramificación no son de tanta importancia, sino que interesa más el rendimiento total de leña.
  - Producción de forraje: no interesa tanto la forma del árbol, pero si es importante la alta capacidad de rebrote, el productividad de forraje y el contenido de nutrientes.

Obviamente una alta tasa de crecimiento vigor sanidad y alta producción de semillas son características deseables en todos estos grupos.

A continuación se dan ejemplos de criterios que se han utilizado para calificar la calidad fenotípica de árboles dentro de los rodales para tres especies. (*C. lusitánica*, *G. arborea* y *G. sepium*) con características de crecimiento y productos distintos. Aunque cada especie tiene sus propias características y hay muchas formas de clasificar los árboles, se presentan ejemplos de los criterios que se pueden utilizar y la forma de integrarlos para que luego se puedan seleccionar los mejores rodales.

### *Cupressus lusitánica* (adaptado de Quiros, 1988)

Esta especie es utilizada para la producción de madera de aserrío y como tal, es necesario seleccionar árboles de buen crecimiento, con el fuste recto en toda su longitud, sin bifurcaciones, sin torcedura basal sin curvaturas repetidas o sinuosidad. Debe estar libre de estrías o acanaladuras y libre de grano espiral. Cuando la corteza se presenta en forma espiralada, es importante hacer un cuidadoso examen de la madera para determinar si ésta contiene también grano en forma espiralada, ya que ésta es una característica indeseable. Se han observado árboles con madera de grano recta mientras que la corteza era espiralada (Dyson, 1969). La autopoda es un rasgo deseable, aunque esta no se presenta en el caso del ciprés y es necesario practicar podas artificiales oportunas, ya que las ramas, aun muertas, permanecen adheridas al fuste por largo tiempo. Las ramas delgadas y regularmente distribuidas son mejores que las ramas gruesas esparcidas de manera irregular a lo largo del fuste, para reducir el grado de defectos en la madera. Es deseable que el ángulo de ramificación tienda a ser lo más horizontal posible (Dyson, 1969).

Para evaluar cada característica, hay que elaborar una clasificación subjetiva que permita valorar los árboles en forma rápida y consistente. A continuación, se dan las categorías de clasificación desarrolladas por Quiros (1988). Es importante mencionar que esta clasificación se debería aplicar únicamente a árboles dominantes o codominantes. Ni se considera la selección de árboles suprimidos; y además se debe descartar automáticamente todos los árboles de diámetro menor que el promedio del rodal.

#### **Rectitud del fuste**

1. Fuste recto
2. Ligeramente torcido: árboles con ligeras desviaciones causadas por curvatura basal, sinuosidad, curvaturas o torceduras. Estos árboles podrían quedar como remanentes después de un raleo selectivo inicial, para ser eliminados en los raleos de refinamiento.
3. Torcido: árboles que manifiestan en manera más severa los defectos mencionados en la categoría 2. La falta de rectitud en estos fustes justifica su extracción desde el primer raleo.
4. Muy torcido: árboles que presentan severas torceduras repetidas o combinación de los otros defectos mencionados. Estos deben desaparecer en el primer raleo.

#### **Grosor de ramas (a partir de la copa viva)**

1. Ramas delgadas: menos de 0,25 del grosor del fuste en el punto de inserción.
2. Ramas medianas: entre 0,25 y 0,5 del grosor del fuste en el punto de inserción.
3. Ramas gruesas: más de la mitad del fuste en el punto de inserción



### **Angulo de inserción de ramas**

1. Recto: salida de las ramas más o menos horizontales, formando un ángulo recto o casi recto con respecto al fuste.
2. Normal: ángulo de salida ligeramente inclinado, menos de 30 grados.
3. Agudo: ángulo de salida agudo y fuertemente ascendente.

### **Bifurcaciones**

1. Ausente
2. Presente (se elimina cualquier árbol dentro de esta categoría)

### **Grano espiral**

1. Ausente
2. Presente (se elimina cualquier árbol dentro de esta categoría).

Por ejemplo, la combinación “11100” sería para un árbol excelente, que tiene fuste recto, ramas delgadas, ángulo de inserción de ramas horizontal, no tiene bifurcaciones y es de grano recto. Se da mayor importancia a la rectitud del fuste y a la ausencia de bifurcaciones.

Con base a las categorías anteriormente definidas para los cinco rasgos morfológicos en estudio, resulta un total de 144 posibles combinaciones de rasgos. El manejo de tal cantidad de tipos de árbol no es práctico y por lo tanto, es preciso clasificar estas combinaciones observadas según su importancia respecto a los propósitos de producción.

Hasta aquí se ha dado una herramienta que permitirá por medio del inventario, calificar fenotípicamente los posibles rodales de ciprés. La selección de los mejores rodales se hace con base en el porcentaje de árboles ubicados en cada una de las categorías.

### ***Gmelina arborea***

En Costa Rica, *G. arborea* ha sido establecida con éxito en plantaciones comerciales y por agricultores en parcelas pequeñas. La especie es utilizada para la producción de pulpa de fibra corta, madera para aserrío, madera rolliza para construcciones rurales y para muebles. Por lo tanto, son deseables los árboles de buen crecimiento, rectos, sin bifurcaciones, con ramas delgadas y con buena capacidad de autopoda. Para esta especie se describe otra alternativa para calificar los árboles semilleros. Al igual que muchas otras latifoliadas, la especie tiende a bifurcarse. Son pocos los árboles no bifurcados, por lo que no se puede evaluar los árboles simplemente con base en la presencia o ausencia de bifurcaciones como en el caso del ciprés. Para *G. arborea* hay que tomar en cuenta el tipo de bifurcación y la altura a la cual esta ocurre. *G. arborea* muestra varias clases de bifurcaciones debido a la tendencia a perder la dominancia del eje principal. En el cuadro 5.1 se presenta un sistema práctico para evaluar árboles de *G. arborea*.

**Cuadro 5.1.** Un sistema para la evaluación de *Gmelina arborea* (adaptado de Barquero, 1983; Lauridsen et al, 1987)

Parámetro	Clasificación	Puntaje
Forma	Recto	6
	Ligeramente torcido	4
	Torcido	2
	Muy Torcido	1
Bifurcaciones	No bifurcado	6
	Bifurcado en el 1/3 superior	4
	Bifurcado en el 1/3 medio	2
	Bifurcado en el 1/3 inferior	1
Dominancia del eje principal	Dominancia completa del eje inicial	2
	Dominancia parcial del eje inicial sobre una rama lateral	1
	Dominancia completa de las ramas laterales	0

De igual forma que para el ciprés, en melina es posible combinar los rasgos anteriores para describir cinco categorías de árboles:

- excelente (14 puntos): se conservan como árboles semilleros.
- buena (10-12 puntos): se pueden conservar como árboles semilleros, cuando no hay suficientes en la categoría anterior.
- regular (9 puntos): se eliminan del rodal
- mala ( 8 puntos): se eliminan del rodal
- muy mal (<7 puntos): se eliminan del rodal

### ***Gliricidia sepium***

Esta especie está siendo cultivada en muchos países tropicales y subtropicales para producción de leña, carbón, puntales para agricultura, madera para productos menores, mangos para herramientas forraje y producción de bio-gas. El árbol es de porte bajo, de fuste usualmente torcido que se bifurca varias veces, con ramas generalmente delgadas y presenta autopoda.

Para seleccionar los mejores rodales para producción de semillas es importante considerar básicamente el aspecto y el vigor del rodal, y no tanto la forma de los árboles. Los árboles seleccionados dentro del rodal deben cumplir los requisitos básicos de crecimiento, vigor, sanidad y alta productividad de sernillas, y, deseablemente, no deberían presentar bifurcaciones muy bajas.

En términos generales, y con base en estos criterios de selección descritos para *C. lusitánica*, *G. arborea* y *G. sepium*, es factible calificar algunas otras especies. En el cuadro 5.2 se muestra esta agrupación.

**Cuadro 5.2.** Especies que pueden ser calificadas por los criterios ya definidos para *C. lusitánica*, *C. arborea* y *G. sepium*

Los criterios para	Especies
<i>Cupressus lusitánica</i>	<i>Pinus</i> spp. <i>Casuarina</i> spp.
<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i> <i>Acacia mangium</i> <i>Eucalyptus</i> spp. <i>Cordia alliodora</i> <i>Bombacopsis quinanta</i>
<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Leucaena leucocephala</i> <i>Guazuma ulmifolia</i> <i>Caesalpinia velutina</i>

Normalmente, no es factible evaluar todos los árboles en cada rodal, por lo cual se establecen parcelas temporales de muestreo en las cuales se evalúa según los métodos descritos anteriormente. Se debe establecer una o más parcelas temporales de 25 a 45 árboles según el tamaño del rodal y la densidad (la intensidad aproximada de muestreo es de una parcela por hectárea). Si el rodal muestra variación en algunas características de sitio (ej. pendiente, suelo), hay que ubicar parcelas en cada condición. Si el sitio es homogéneo, la distribución de las parcelas debe hacerse al azar. Estas parcelas pueden ser de forma cuadrada, rectangular o circular según las condiciones de sitio. La parcela circular es más rápida de establecer, excepto en pendientes fuertes donde es más fácil la parcela rectangular. En este caso, se debe colocar el lado más corto paralelo a la pendiente.

Conociendo la edad, el promedio del dap, la altura total y la calificación de la forma de cada árbol, en estas parcelas temporales se puede cuantificar el potencial del rodal para convertirlo o no en rodal semillero.

**Importancia de la edad del rodal**

El rodal que sea seleccionado para producción de semilla debe tener la edad suficiente para mostrar las características, de interés de los árboles y la capacidad de producción de semillas, pero también lo suficientemente joven para que continúe produciendo semilla por muchos años. Algunas especies muestran características indeseables después de cierta edad, como por ejemplo ciertas

procedencias de *E. camaldulensis* y *T. grandis*, que se bifurcan después de alcanzar alturas de 5 a 8 m. Asimismo, algunas especies no producen semilla bajo ciertas condiciones de sitio; en estos casos, los rodales obviamente deben descartarse, aunque los árboles sean excelentes para las otras características.

Para ciprés, por ejemplo, deben seleccionarse rodales con edades entre 6 y 15 años, entre 6 y 10 años para *C. arborea*, 6 a 15 años para *T. grandis*, 3 a 5 años para *L. leucocephala*, 5 a 8 años para *E. deglupta* y entre 10 y 20 años para *B. quinata*.

### **El área del rodal**

La consideración del área manejada como rodal semillero debe tomar en cuenta aspectos como la cantidad de semilla requerida a mediano plazo, la posible contaminación con fuentes extrañas de polen, los posibles efectos de endogamia y la economía de escala.

El área del rodal semillero debe ajustarse a los cálculos de producción y demanda de semilla. Según la existencia de plantaciones en el país, esto puede implicar que haya necesidad de manejar uno o más rodales.

Las parcelas pequeñas también deben ser consideradas, principalmente cuando estas parcelas son las únicas de una especie introducida en la región, para la cual también hay dificultad para importar semilla.

Es importante considerar que los costos por unidad de área manejada aumentan con la reducción del tamaño del rodal, haciendo menos económica la producción de semillas. También el costo de manejar la misma área de rodal es mayor si esta se encuentra en dos sitios separados en vez de uno.

### **Importancia del aislamiento del rodal**

Como se mencionó en la sección anterior, es importante asegurar que el rodal esté adecuadamente aislado de fuentes de polen de calidad desconocida, si se quiere lograr la ganancia genética deseada. El aislamiento total es casi imposible dado que el polen puede ser transportado por el viento, insectos y otros animales a distancias muy grandes. La distancia mínima de separación varía para cada especie dependiendo del método de polinización, y para cada rodal dependiendo de su forma y tamaño. 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 rodales de mayor área y de forma cuadrada; por eso un solo rodal grande es preferible que varios pequeños (Hughes y Robbins, 1982). Cuando sólo existe la posibilidad de establecer varios rodales pequeños, hay que intervenir las plantaciones vecinas para eliminar los árboles indeseables o hacer una tala final de dichas plantaciones antes de que el rodal semillero entre en producción. Si la fuente de contaminación proviene de cercas vivas, un aislamiento adecuado sería posible realizando podas anuales de tal forma que no haya floración de los árboles.

Si las plantaciones son grandes, es posible manejar la producción de semillas para que solamente una parte de ella produzca. En estos casos hay que definir el “área efectiva de producción” y el “área de barrera para aislamiento”. Para esto hay que seleccionar el área que cumpla mejor con los requisitos en cuanto a desarrollo y facilidad de manejo y, si es una especie polinizada por el viento, que esté en la dirección de entrada del viento. Al mismo tiempo se debe establecer una faja periférica de protección (o de aislamiento) entre la sección comercial y el rodal semillero. Dicha faja debe ser intervenida bajo los mismos criterios utilizados para el área para producción de semillas, pero no se debe recolectar semilla dentro de ella. La faja debe tener un ancho mínimo de 100m. De esta forma se reduce la contaminación con polen indeseable.

### **Importancia de la accesibilidad al rodal**

Es muy importante asegurar el acceso vehicular fácil a los rodales 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 seleccionar rodales en terreno plano, lo cual reduce los costos de mantenimiento y recolección y permite la mecanización de algunos trabajos (Hughes y Robbins, 1982). Si hay problemas serios de accesibilidad al rodal, principalmente durante la época de cosecha, o no hay seguridad de que el propietario lo proteja por varios años, es mejor no considerarlo como rodal semillero aunque los árboles muestren buenas características.

### **Selección entre rodales**

La sección de un rodal entre varios posibles implica tomar en consideración una serie de factores, y representa una de las etapas más críticas y problemáticas del proceso de establecimiento de rodales semilleros. La selección se hace tomando en cuenta la cantidad fenotípica de individuos, según las características analizadas, y el área de la plantación disponible en función de las necesidades de semillas, así como los otros factores mencionados en los puntos anteriores.

Una vez realizado el inventario, estos rodales deben ser clasificados para poder compararlos y seleccionar los mejores. La selección debe tomar en cuenta que normalmente en cualquier especie existen diferencias grandes en crecimiento entre rodales creciendo en diferentes suelos o zonas ecológicas.

Si no es posible efectuar una evaluación completa, como se describió anteriormente, entonces, de manera subjetiva, los rodales pueden ser clasificados como superior, normal y no apto, con base en la apariencia de los individuos que lo conformen (Keiding, 1975). Se clasifican como rodales superiores aquellos que al ser comparados con el resto de las plantaciones

de la misma especie en el país, presentan un comportamiento muy superior al promedio, en cuanto a las características deseables de forma, vigor y sanidad.

Sin embargo, es posible ser un poco más objetivo con base en la proporción de árboles con forma excelente y buena en cada rodal. Para los rodales de *C. lusitánica* en Costa Rica, por ejemplo, se utilizaron cuatro categorías: ideales, apropiados, posibles y descartables (Quiros, 1988).

### **Selección dentro del rodal**

Una vez identificado el mejor rodal, es necesario manejarlo para convertirlo en un rodal semillero la parte más importante del manejo consiste en eliminar todos los árboles con características indeseables, como individuos suprimidos, bifurcados, con fustes torcidos y enfermos. Para no producir un impacto ambiental brusco en el rodal 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 rodal en la condición óptima. La frecuencia y la intensidad de cada intervención dependerán del estado del rodal al empezar el proceso.

Así por ejemplo, un rodal poco denso, ya sea por tener una densidad inicial baja o por haber sido sometido a varios raleos silviculturales, posiblemente con una o dos intervenciones pueden quedar en condiciones aceptables. Si el rodal es denso y los árboles muestran una competencia fuerte, será necesario planificar la ejecución de dos o más intervenciones, para ir liberando paulatinamente las copas de los árboles que finalmente conformarán el rodal semillero.

Cuando se trata de rodales jóvenes, los raleos pueden iniciarse una vez que las copas hayan cerrado, ya que si se dejan se inicia el autoraleo, las copas no desarrollan bien y después será más difícil estimular el crecimiento para buenas producciones de semilla. Con tres raleos es posible bajarla densidad de 1600 a 100 árboles por hectárea en un periodo de cuatro a cinco años (Cuadro 5.3).

**Cuadro 5.3** Planificación del raleo en un rodal semillero (2.5 x 2.5 m de distanciamiento inicial).

Árboles / ha	Raleo (%)	Año de intervención
1600	50	1 año después de cerrar las copas
800	50	2 años después del primer raleo
400	75	2 años después del segundo raleo
100		

En un rodal maduro con un número igual de intervenciones, es posible llegar a una densidad final similar en un periodo más corto.

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 (Zobel y Talbert, 1988).

Para decidir cuales árboles se deben eliminar en cada rodal, se pueden utilizar en orden de prioridad los siguientes cuatro criterios básicos:

- Posición del árbol en el dosel: deben ser marcados todos los árboles suprimidos y los intermedios en altura. Se seleccionan entre dominantes y codominantes, pero entre estos puede haber también una selección por crecimiento.
- Forma: deben ser marcados los árboles que muestren forma indeseable según los criterios definidos para cada especie.
- Espaciamiento: 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 en el rodal, 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.
- Otros: Los árboles que muestren evidencias de enfermedades deben ser marcados para cortarlos, aunque presenten buenas características de forma y crecimiento.

La forma práctica de realizar la selección y marcación varía principalmente con la densidad del rodal. En el caso de plantaciones no raleadas, con espaciamiento regular, se puede utilizar lo que se conoce como “caja de nueve”, con la idea de subdividir el rodal en unidades más pequeñas y lograr controlar más fácilmente el espaciamiento final, al realizar todos los raleos en el rodal. La persona que realiza la selección se debe ubicar en el centro de nueve árboles, en los cuales debe practicar la selección según la intensidad que haya definido. Luego se desplaza al grupo siguiente y repite el proceso hasta completar la marcación en el rodal. Por ejemplo, si la intensidad del primer raleo es del 50 por ciento, y se marcan cuatro árboles para cortar en la primera caja, en la segunda caja se deben marcar cinco árboles para cortar.

Si hay dos árboles similares y de forma regular en la misma caja, no vale la pena tomar mucho tiempo en decidir cuál se debería dejar, dado que al completar

todo el proceso de raleos en el rodal, ambos árboles serán eliminados. La elección de los árboles a dejar se debe tomar con base en la distribución del espaciamiento hasta el próximo raleo. En el caso de rodales naturales o plantaciones ya raleadas, donde el espaciamiento regular ya no es visible, un sistema práctico es ubicar a simple vista ocho árboles en cuadro y aplicar un sistema similar al de la caja de nueve.

La marcación para el raleo (con cuchillo, pintura o cinta) debe hacerse en los árboles a cortar; de lo contrario existe el peligro de que se eliminen árboles buenos que hayan perdido la identificación. Una vez que han sido identificados y marcados los árboles a eliminar, se debe empezar la corta. En esta etapa hay que tener cuidado para evitar el maltrato de la copa y la corteza de los árboles semilleros. El material que se corta en cada intervención debe ser extraído del rodal para eliminar posibles focos de plagas y enfermedades, facilita los trabajos de mantenimiento y cosecha de semilla y si es posible, obtener ingresos adicionales mediante su comercialización.

### **Mantenimiento del rodal semillero**

El mantenimiento del rodal 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, cosecha y mantenimiento. Las siguientes son las actividades principales que deben ser planeadas y realizadas:

- Definir el área de recolección y la zona de aislamiento. Marcar cada una de estas en el terreno con zanjas y un pequeño poste tratado y enterrado en el suelo. Hacer un croquis del rodal con indicaciones de cómo llegar a él.
- Si es necesario deber hacerse una cerca para evitar la entrada de ganado.
- Es necesario mantener en la época seca una ronda limpia de por lo menos tres metros, para reducir las posibilidades de incendios.
- Mantener permanentemente el rodal libre de malezas.
- Hacer los drenajes necesarios para evitar el encharcamiento.
- Hacer inspecciones periódicas para detectar la presencia de plagas o enfermedades, que puedan afectar la producción de semillas.
- Eliminar los árboles o ramas muertas cuando se realizan las limpiezas.
- La aplicación de fertilizantes puede aumentar la producción de semillas, no obstante, en este aspecto hace falta información sobre dosis; y aspectos de costo/beneficio de la aplicación. Es evidente que la época de aplicación es crítica, pero si no hay información, 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

- Considerar la posibilidad de manejar las copas para facilitar la recolección de semilla. Esto consiste en cortar el eje principal en la parte alta de la copa, para estimular el crecimiento lateral.
- Registrar todas, las actividades de mantenimiento que se realizan en el rodal. De esta forma será más fácil controlar la eficiencia del mismo en la producción de semillas.
- Con base en los registros de producción del rodal, 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.

### Producción y cosecha de semillas

Se recomienda iniciar la recolección de semillas hasta que el rodal esté completamente establecido. Durante los primeros años después del establecimiento, la producción de semillas por área es baja, porque las copas de los árboles aun no han respondido a los raleos.

66

La recolección de semillas en los rodales semilleros debe ser estrictamente controlada, para asegurar que se realice dentro del área de recolección. Es muy importante que durante la recolección se eviten daños a los árboles, en particular a las ramas; de esta forma se podrán evitar reducciones fuertes en la producción de semillas en los años siguientes.

Hay que realizar observaciones anuales para determinar la capacidad de producción de semillas de cada uno de los rodales de las distintas especies de interés. Esta información permitirá determinar el potencial de producción de semillas y ayudará a asegurar el material para proyectos de reforestación. Estas observaciones se deben realizar por lo menos en un rodal por especie/procedencia y en cada condición ecológica.

Durante las recolecciones es importante mantener controles, para aumentar el conocimiento sobre la especie y facilitar la planificación de trabajos futuros.

### Manejo de los registros del rodal

Es muy importante recopilar y guardar en un archivo toda la información referente a cada rodal para ejercer un control adecuado. Esto permitirá suministrar información clara y precisa al investigador, al responsable de los rodales y al consumidor de semillas. Un técnico debe ser el responsable del manejo y actualización de estos archivos. Como mínimo, se deberían mantener los siguientes archivos:

- Localización e inventario de posibles rodales semilleros.
- Calificación de rodales semilleros.
- Descripción del sitio.
- Hojas de historial, en las que debe anotar todas las labores que se realizan, así como observaciones sobre la floración, fructificación, problemas de sequia, etc.
- Una hoja de catastro con la localización del rodal.
- Un croquis en papel cuadriculado que muestre con claridad como localizar el rodal.
- Un plan de manejo que incluya Las fechas previstas para la realización de las actividades.
- Un registro anual de producción de semillas. Se debe anotar la producción de semilla por parcela. 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.

## Referencias

- Barquero, M.E 1985. Establecimiento de rodales semilleros de *Gmelina arborea* Roxb~, Hojancha,. Guanacaste. Tesis Ing. For. ITCR, Cartago, Costa Rica. 107 p.
- Dyson, G. 1969. Improvement of stern form and branching characteristics in Kenyan cypresses.~ In: World Consultation on Forest Tree Breeding (vol .2, 1969. Washington, D.C.). Documentos, Roma, Italia, FAO,V.1. pp.O3-31 5.
- Hughes CL; Robbins, A.M.J.. 1982. Seed stand establishment procedures for *Pinus oocarpa* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in the natural forests of Central America. *Commonw. For. Rev.* 61(2):107-1 ~3.
- Jones, N.; Burley, J. 1973. Seed certification, provenance nomenclature and genetic history in 'forestry. *Silvae Genet* 22(3):53-58.
- Keiding, H. 1975. Sced stands. Report on the FAO/DANIDA Training Course on Forest Seed Collection and Handling. (1975, Chiang Mai, Thailand). Report. Chiang Mai, V. 2. pp. '192-211.
- Lauridsen, E.B. Wellendorf H.; Keiding, H. 1987. Evaluation of a series of international trials of *Gmelina* provenance. Humlcbnek, Denmark, DANIDA Forest Scud Centre <sup>110</sup>p

- Matthews, J.D. 1944. Seed production arid seed certification. *Unasyva* (FAO) 18 (2-3):1 04-118
- Oskarsson, O. 1971 Selection differential and the estimate of genetic gain in plus stands, *Folia forestalia*. 104 p.
- Quirós, R. 1988. Selección de rodales semilleros de ciprés (*Cupressus lusitanica* Miii) en ei Valie Central, Costa Rica. Tesis Ing. For., Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 83 p.
- Salazar, R. Boshier, D.H. 1 989. Estab1ecimiento y manejo de rodales semilleros de especies forestales prioritarias en América Central. CATIE (C.R.). *Serie Técnica. Boletín Técnico* No. 20.80 p.
- Shelbourne, C.J.A. 1 960 Provenance seed stands and provenance conservation stands, DANIDA (Dinarnarca). Technical Note N° 14, 42 p
- Zobel, B.; Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed.Llmusa, Wxico. 545 p.

#### 4.14 ENSAYOS DE PROCEDENCIA

68

A continuación se presenta el texto del siguiente documento: Mesen, J.F. Selección de Especies y procedencias. Pp. 24-36 en Cornelius, Mesen y Corea (eds.) 1993

##### Introducción

En la actualidad se reconoce ampliamente que el éxito en el establecimiento y productividad de las plantaciones forestales depende en gran medida de la selección correcta, no solo de la especie, sino también de la fuente de semilla dentro de la especie. La semilla representa un pequeño porcentaje de los costos totales de plantación; no obstante, una mala elección puede llevar a mas problemas a mediano y largo plazo que casi cualquier otro factor. La importancia de utilizar la fuente de semilla apropiada para cada sitio ha sido demostrada en cientos de ensayos establecidos en todo el mundo, principalmente en los últimos 20 años. Los ensayos de procedencias a lo largo de muchos años; por lo tanto, deben ser establecidos y manejados apropiadamente, para que todo ese esfuerzo se traduzca en resultados: confiables y aplicables a los programas de mejoramiento genético y de reforestación comercial.

## El proceso de selección y evaluación

Burley y Wood (1979) describieron el proceso teórico de selección y evaluación de ensayos de especies y procedencias mediante una serie de etapas que incluían:

- Arboretum
- Eliminación de especies
- Evaluación de especies promisorias
- Comprobación de especies
- Procedencias de todo el rango de distribución
- Procedencias selectas
- Comprobación de procedencias
- Plantaciones piloto
- Plantaciones comerciales.

Sin embargo, dada la premura que existe por la obtención de resultados prácticos y la carencia de recursos, este proceso idealizado rara vez se lleva a cabo. Generalmente, una o más de estas etapas se omiten, se combinan o se traslapan. En la última década, ha habido una tendencia hacia la simplificación de este proceso (Willan et al. 1990).

Uno de los problemas principales de los ensayos de especies es que normalmente se ha utilizado un único lote de semilla para cada especie. Este tipo de ensayo es de utilidad limitada y proporciona poca información para fines de mejoramiento y reforestación comercial, ya que no se puede desechar una especie por el comportamiento de una de sus poblaciones. Además, es posible utilizar la experiencia generada en otras regiones similares para suponer de antemano la posible adaptación de las especies al sitio, o utilizar la información de parcelas o plantaciones existentes en el sitio de prueba. De esta manera, la tendencia actual es iniciar el proceso de investigación directamente con la selección de procedencias.

Dentro del proceso de selección de procedencias, también se está dando una tendencia hacia la simplificación. En muchos casos, si la fase de procedencias del rango total (PRT) ha sido conducida apropiadamente y ha incluido una representación adecuada de la variación genética de la especie, no tiene sentido conducir la fase de procedencias selectas. La mayoría de los programas de mejoramiento están procediendo directamente de la fase de PRT al establecimiento de rodales o plantaciones semilleras y al inicio de programas de mejoramiento genético al nivel de selecciones individuales.

Por las razones anteriores, este documento se concentra en el proceso de evaluación y selección de procedencias únicamente.

## Ensayos de procedencias

Existe una gran cantidad de términos relacionados con procedencia que se pueden prestar a confusión, ya que no hay consenso entre los investigadores y cada cual los utiliza según su criterio. En centroamérica, se recomienda la adopción de las definiciones de Styles (1979) y Burley y Wood (1979) por considerarlas más acordes con los términos populares y por lo tanto menos propensas a causar confusión. Dichos autores definen procedencia como el área geográfica y ambiental donde crecieron los árboles progenitores, dentro de la cual se ha desarrollado su constitución genética por selección natural y/o artificial. La población de progenitores debe tener una base genética amplia y puede ser nativa o no nativa (introducida), en cuyo caso se hablaría de una procedencia nativa o una procedencia derivada, respectivamente. El término fuente de semilla se trata como sinónimo de procedencia. El término “origen” significa el área geográfica original (en el bosque nativo) donde crecieron los árboles progenitores, y puede coincidir o no con la procedencia. Por ejemplo, si se recolecta semilla de un rodal natural de *Cordia alliodora* en la Ceiba, Honduras para establecer una plantación en Turrialba, Costa Rica, dicha semilla se clasificaría como de origen La Ceiba. Sin posteriormente se recolecta semilla de la plantación establecida en Turrialba, esta se clasificaría como de origen La Ceiba, procedencia derivada Turrialba.

El término “exótico” se refiere a aquella que crece fuera de su rango natural. No es conveniente utilizar este término con relación a divisiones o fronteras políticas, que generalmente guardan poca o ninguna relación con las divisiones ecológicas.

El término “raza local” se refiere a aquellas poblaciones exóticas que se han adaptado por selección natural al ambiente específico donde fueron plantadas.

Un ensayo de procedencias es una plantación de varias procedencias establecidas en un mismo sitio de tal manera que permita una comparación estadísticamente válida entre ellas en cuanto a productividad y otras características. En la terminología biológica se denominan ensayos de “jardines comunes”.

### **La importancia de la procedencia**

Cuando se plantan árboles de varias procedencias en un solo lugar, pueden darse grandes diferencias en comportamiento entre las procedencias para características de interés económico. De la misma manera, las varias procedencias no necesariamente se comportan igual en ambientes diferentes,

fenómeno común denominado interacción genotipo-ambiente. En ambos casos, las diferencias en comportamiento pueden ser dramáticas, sobre todo en especies de distribución natural muy amplia, de ahí la importancia de las pruebas de procedencias antes de iniciar programas de reforestación o mejoramiento genético. No tendría sentido pasar años mejorando una población hasta obtener niveles que pudieron haberse logrado desde el inicio con la selección de la procedencia correcta. La selección de procedencias es una etapa básica en el mejoramiento genético forestal, proporcionando el punto de partida para actividades de reforestación comercial y programas avanzados de mejoramiento genético.

### **Objetivos de los ensayos de procedencias**

Las pruebas de procedencias no son el lugar para conducir prácticas silviculturales tales como ensayos de espaciamiento, fertilización, preparación de sitio, raleos, etc., y sus objetivos principales generalmente deberían limitarse a los siguientes:

- Identificar las procedencias más sobresalientes en términos de volumen, forma y calidad de materia, producido, y capacidad para producción sostenida (adaptación fisiológica al sitio).
- Determinar si existen interacciones genotipo-ambiente.
- Si las interacciones son importantes, identificar las mejores procedencias para cada sitio.
- Identificar las procedencias con mayor potencial para mejoramiento mas avanzado y producir material de selección para construir la población de mejoramiento.
- Conocer los patrones de variación genética entre poblaciones de la especie.

### **Obtención de semilla para las pruebas de procedencias**

Hay básicamente dos maneras de conseguir semilla para ensayos de procedencia: mediante la participación en redes internacionales de ensayos o a través de recolecciones locales.

Para especies de distribución natural muy amplia, la obtención de semilla para ensayos de procedencias del rango entero requiere necesariamente de la cooperación internacional, ya que sería sumamente difícil para un solo proyecto o país, en términos prácticos y económicos, realizar recolecciones a lo largo de todo el rango natural de la especie.

Las recolecciones de procedencias a nivel nacional, principalmente para especies nativas, son también de gran importancia, especialmente para países como los centroamericanos donde existe una gran variabilidad ecológica dentro

de distancias muy cortas, y se pueden esperar variaciones importantes a lo largo del rango local de distribución de la especie. Este tipo de recolecciones si están al alcance de programas locales.

Generalmente no existe suficiente información como para conocer de antemano los patrones de variación genética que permitan planear mejor la selección de procedencias. El conocer estos patrones es, incluso, uno de los objetivos de los mismos ensayos de procedencia. En la práctica, las recolecciones se realizan con base en la información disponible sobre la variación dentro de la especie, la variación ecológica y los límites prácticos impuestos por las condiciones locales y los recursos disponibles.

Las procedencias incluidas en el ensayo deberían ser una buena muestra de la variabilidad ecológica del rango de distribución de la especie. También es importante incluir razas locales o fuentes mejoradas, si existen. Existen bastantes ejemplos donde las razas locales, han superado significativamente el comportamiento de cualquier otra procedencia de introducción reciente (ver por ejemplo Mesen, 1990; Valerio, 1986;). Una ventaja clara de esta práctica es que, si la raza local demuestra superioridad sobre las demás procedencias, como ocurre en muchos casos, se puede utilizar inmediatamente esta fuente para la producción de semilla comercial.

También se debe incluir testigos estándar, que pueden ser la fuente utilizada comercialmente o la mejor fuente disponible (a veces será la misma raza local). El uso de los mismos testigos en todos los ensayos aumenta grandemente la eficiencia de las comparaciones entre ensayos establecidos en años anteriores.

Como regla general, los ensayos siempre deberían incluir: i) procedencias de la zona ecológica que más se asemeje al sitio de introducción, ii) procedencias que se extiendan hacia extremos importantes del rango de distribución, por ejemplo, ecotipos creciendo en áreas mas secas, mas infértiles, etc., que el promedio para la especie (Edwards y Howell 1962). Estas últimas son importantes porque pueden poseer características adaptivas de gran potencial para ciertos ambientes en particular (Turnbull 1975; Palmberg 1985; Willan et al. 1990).

### **Consideraciones importantes en la recolección de semilla**

Una consideración fundamental en las recolecciones de procedencias, es la constitución genética del material. La semilla de solo uno o pocos árboles no es representativa de la población total, y debe evitarse. Para la mayoría de las especies tropicales no existen estudios detallados sobre los sistemas de cruzamiento y variabilidad genética dentro de las poblaciones, que permitan tomar decisiones precisas sobre el numero de árboles a muestrear y el distanciamiento optimo entre árboles, a fin de evitar consanguinidad y obtener una muestra genéticamente representativa. Como regla general se recomienda recolectar de 30 a 50 árboles, separados a un distanciamiento tal que permita

incorporar el mayor rango posible de genes y que reduzca en lo posible la inclusión de individuos emparentados. Una distancia mínima entre árboles de 100 metros se considera aceptable. En esta etapa, la selección de árboles no debe ser muy rigurosa. Las recolecciones pueden hacerse de muy mal forma o que tengan muy poca semilla. La selección de únicamente individuos sobresalientes puede llevar a una reducción en la variabilidad genética que no necesariamente será benéfica a este nivel, donde lo que se busca es evaluar el potencial de la procedencia como tal.

En las recolecciones de procedencia es vital suministrar información completa sobre la ubicación, características climáticas y edáficas del área de recolección de la semilla. Asimismo, se debe indicar el número, espaciamiento y las características de los árboles madre incluidos en la muestra. Es inaceptable que aun se manejen lotes de semilla cuya única identificación es el país de origen. Se debe recordar que la semilla sin información no tiene ninguna utilidad en el ensayo.

En las recolecciones de procedencia la semilla no se mantiene separada del árbol madre, sino que esta se mezcla de forma tal que cada árbol seleccionado este representado por igual en la muestra de la procedencia (i.e. cada árbol madre produzca el mismo número de plántulas). Idealmente, la representación de cada árbol debería decidirse basándose en pruebas individuales de germinación, aunque esto raramente es posible.

### **La fase de vivero**

Las labores de producción de plantas en vivero para los ensayos de procedencias deben seguir básicamente los procedimientos rutinarios normales para la especie en cuestión. Sin embargo, hay tres aspectos que deben considerarse en el caso del material para los ensayos, que normalmente no aplican en el caso de producción comercial: i) todo el material debe estar sometido a las mismas condiciones ambientales, para no perjudicar el comportamiento de las procedencias. Esto puede lograrse utilizando un diseño experimental en el vivero, pero normalmente basta con asegurarse que las condiciones ambientales sean las mismas para todas las procedencias; ii) se deben tomar todas las medidas necesarias para evitar la mezcla de materiales o confusiones entre lotes, lo cual sería fatal para el desarrollo del experimento, y iii) no se debe realizar selección de la semilla por tamaño (tamizado), ya que de esta manera se puede perder material e información genética valiosa. El tamaño de la semilla es en alto grado una característica maternal, de modo que se podrían eliminar familias completas si se adopta esta práctica.

Se debe producir suficientes plantas por procedencia considerando las pérdidas en el vivero y en el campo. Si sobra material después de plantar parcelas útiles, los bordes y realizar el replante del experimento, este puede establecerse en parcelas individuales identificadas por procedencia, que serán de utilidad para



selecciones posteriores e incluso para su conversión eventual en plantaciones semilleras de procedencia superiores, una vez que los ensayos proporcionen información confiable sobre las mejores fuentes.

### **Selección de sitios**

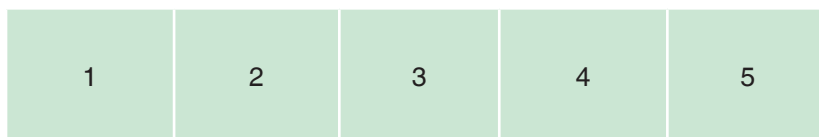
Una localidad donde se llevara a cabo la reforestación raramente es tan uniforme como para que un solo experimento proporcione resultados aplicables al área entera. Esto es mucho más crítico cuando se trabaja a nivel de países o regiones. Idealmente, el área potencial de plantación se debería dividir de acuerdo a características ecológicas (clima, suelo, factores bióticos), y establecer repeticiones completas del ensayo en cada sub-división para poder estimar los efectos de la interacción procedencia-ambiente. Se debe tener cuidado de no seleccionar micrositios atípicos que proporcionen resultados de poca utilidad para el área global de plantación. Asimismo, se debe evaluar la representatividad de los tratamientos como: la selección del sitio de establecimiento, la regularidad del mantenimiento y la frecuencia del monitoreo, por ejemplo, que pueden estar sesgados por estar cerca de la sede. **Si los sitios donde se establecen los ensayos de plantación o los tratamientos, no son representativos de la zona o del cuidado de la plantación actual o potencial, estos ensayos tienen poca utilidad.**

### **Diseño experimental**

El objetivo básico de los diseños experimentales es proveer un estimado preciso de las diferencias genéticas entre las procedencias, tratando de minimizar los efectos de la variación ambiental dentro del sitio experimental (ej, variaciones en drenaje, fertilidad, etc.). Un buen diseño es aquel en el cual el error experimental (la parte de la variación debida a causas desconocidas) es mínimo (Matheson 1990).

### **Importancia del diseño experimental**

Si obtenemos semilla de cinco procedencias, podríamos decidir realizar una plantación de cada procedencia para seleccionar la mejor, como se muestra en la figura 3.1



**Figura 3.1** Plantación de cinco procedencias en un solo bloque.

Cuando evaluemos el experimento, sin embargo, no será posible decir si la mejor procedencia fue mejor debido a su superioridad genética o debido a alguna influencia ambiental dentro del sitio (por ejemplo, porque existía un gradiente

de fertilidad, drenaje, etc.). Es decir, el experimento no permitió separar los efectos genéticos de los efectos ambientales, de manera que no se pueden hacer conclusiones sobre potencial de las procedencias en otros sitios diferentes.

Es claro que para poder evaluar el potencial genético de las procedencias, es necesario tomar en cuenta la variación ambiental dentro del sitio, de manera que todas las procedencias tengan la posibilidad de crecer en toda la gama de condiciones diferentes presentes dentro del sitio experimental.

Existe una serie de diseños disponibles a los forestales, y el uso de uno u otro deberá decidirse de acuerdo a la naturaleza del ensayo y sus objetivos. En algunos casos, además de la evaluación de procedencias, los ensayos también cumplirán otros objetivos, tales como conservación de genes y/o producción de semilla. Independientemente del diseño utilizado, existen dos condiciones generales que se deben cumplir en todos los casos:

- i) Aleatorización – las procedencias se deben ubicar dentro de los bloques o las repeticiones en forma aleatoria, y
- ii) Repetición – las parcelas de cada procedencia deben estar repetidas varias veces dentro del sitio experimental, para evitar los problemas mencionados anteriormente.

### ***Diseño completamente al azar***

En este diseño, las parcelas con las varias procedencias se distribuyen aleatoriamente dentro del sitio. Este diseño es útil cuando la variación ambiental dentro del sitio es mínima. Sin embargo, aun dentro de cámaras de ambiente controlado existen diferencias ambientales, más aun en los sitios heterogéneos que normalmente están disponibles para ensayos forestales. Por esta razón, este diseño no es muy útil para ensayos de procedencias.

### ***Diseño de cuadrado latino***

El diseño de cuadrado latino tiene la ventaja de que permite utilizar sitios que presentan variación ambiental en dos sentidos. En este diseño, los tratamientos se ubican en filas y columnas, y cada tratamiento aparece una vez en cada columna y en cada fila, como se muestra en la figura 3.2

Los cuadrados latinos raramente se utilizan en experimentos forestales, porque existen otros diseños igualmente eficientes y que requieren menos terreno (Matheson 1990).

		Columnas				
		1	2	3	4	5
Filas	1	1	2	5	3	4
	2	4	1	3	2	5
	3	2	3	4	5	1
	4	3	5	1	4	2
	5	5	4	2	1	3

**Figura 3.2** Diseño de cuadrado latino con cinco procedencias.

### ***Diseño de bloques completos al azar***

Este diseño es el más utilizado en experimentos forestales, ya que es fácil de establecer y analizar, aun con una calculadora de oficina, y es estadísticamente robusto. En el diseño de BCA, las parcelas de procedencias se ubican aleatoriamente dentro de varios bloques, de manera que cada bloque contiene representación de todas las procedencias (Figura 3.3).

Frecuentemente, la variación ambiental dentro del sitio toma la forma de gradientes ambientales, por ejemplo de pendiente. En estos casos, los bloques deben ubicarse perpendicularmente a la gradiente. Cuando la variación se da en parches, por ejemplo áreas que varían en fertilidad, drenaje, etc., los bloques se deberían ubicar de tal manera que cada una de estas áreas contenga un bloque completo, aunque en la práctica esto puede ser difícil de realizar con precisión.

		Bloques				
		I	II	III	IV	V
↓		4	2	5	3	4
↓		5	1	3	2	2
Gradiente		2	3	4	1	5
↓		3	5	1	5	1
↓		1	4	2	4	3
↓						

**Figura 3.3** Diseño de bloques completos al azar con cinco procedencias en cinco bloques

Se busca uniformidad dentro de las parcelas y de los bloques. La uniformidad entre bloques no tiene importancia, y si es necesario, los bloques pueden plantarse separadamente a fin de evitar situaciones atípicas tales como áreas pantanosas o rocosas, zanjas, caminos antiguos, etc. Sin embargo, se debe procurar que el experimento sea tan compacto como sea posible.

El diseño de BCA tiene la desventaja de que cuando el número de procedencias bajo la evaluación es muy alto, se vuelve difícil lograr homogeneidad dentro del bloque. En estos casos se debe utilizar otro tipo de diseño, especialmente cuando el sitio experimental es muy heterogéneo (Matheson 1990).

**Bloques incompletos al azar (BIA)**

Los BIA son una buena alternativa cuando el número de tratamientos es muy alto, aunque también pueden utilizarse para pocos tratamientos. En este diseño, cada bloque contiene menos tratamientos que el número total de tratamientos bajo evaluación (fig. 4). En este caso, los bloques incompletos no pueden agruparse para formar repeticiones completas, por lo cual las opciones para los análisis son muy limitadas (Matheson 1990).

		Bloques							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
↓		1	2	5	4	7	8	2	7
Gradiente		3	4	2	5	8	6	8	6
↓		7	6	1	2	3	7	1	5
↓		8	5	3	6	1	4	3	4

**Figure 3.4** Diseño de bloques incompletos al azar con ocho procedencias en ocho bloques con cuatro repeticiones

**Latiles**

Los latiles son un tipo de diseño de bloques incompletos mucho más útil para experimentos forestales, que permite la evaluación de un gran número de tratamientos y relativamente pocas repeticiones (Matheson 1990). En este caso, los bloques incompletos pueden agruparse para formar repeticiones completas de todos los tratamientos bajo evaluación (Fig. 3.5). Los latiles hacen un uso óptimo de áreas pequeñas, ya que ocupan menos área que otros diseños, sin perjudicar la precisión del análisis. El análisis de los latiles es más sencillo cuando el diseño está balanceado; para latiles cuadrados, el número de procedencias debe ser un cuadrado perfecto (ej.  $k^2$  : 9, 16, 25, etc.), y el balance se logra utilizando  $k + 1$  repeticiones.

		Repetición											
		I			II			III			IV		
	I	1	2	3	1	4	7	1	5	9	1	8	6
Bloque	II	4	5	6	2	5	8	7	2	6	4	2	9
	III	7	8	9	3	6	9	4	8	3	7	5	3

**Figure 3.5** Latice balanceado con 9 procedencias y cuatro repeticiones (Cochran y Cox, 1957).

### ***Espaciamiento, forma y tamaño de parcela***

Las parcelas con distribución en cuadro son las más usuales con distancias entre árboles que van desde 1 a 4 metros, dependiendo de la especie y los objetivos. Para especies maderables los espaciamientos más utilizados son 2,5 x 2,5 y 3,0 x 3,0 metros. Como regla general, se debe seguir las normas comerciales de espaciamiento, ya que esto aumenta la aplicabilidad de los resultados.

El utilizar espaciamientos menores permite utilizar menos terreno, lograr mayor uniformidad ambiental dentro de las parcelas y los bloques, reducir los costos de mantenimiento y estimar la habilidad competitiva de las procedencias a una edad temprana. Las desventajas son que los raleos son necesarios a menor edad cuando el potencial de las procedencias tal vez no se ha expresado completamente, se reduce la capacidad del ensayo desde el punto de vista de conservación de genotipos y, si las parcelas están en líneas, se pueden tomar decisiones erróneas sobre procedencias de lento crecimiento inicial.

El diseño compacto es más económico en términos de terreno y plantas de borde que los diseños de forma irregular, y deberá preferirse cuando las condiciones del terreno lo permitan. Lo mismo aplica para la forma de las parcelas individuales; es preferible una parcela de 6x6 que una de 4x9 árboles.

La tendencia en ensayos de procedencias es favorecer un mayor número de bloques a cambio de parcelas más pequeñas. En un diseño de BCA, por ejemplo, es preferible siete bloques y parcelas de 36 árboles que cuatro bloques y parcelas de 64 árboles. El tamaño de parcelas más recomendado es de 6x6 árboles, en la cual se evalúan las apropiadas debido a que la competencia puede favorecer las procedencias de crecimiento inicial rápido, que no necesariamente serán las mejores al final del turno. Se han utilizado parcelas de 3x3 y hasta de 10x10 árboles, pero la de 36 representa el mejor equilibrio entre economía de recursos, validez estadística y cumplimiento de los objetivos del ensayo.

### **Manejo del ensayo**

Generalmente hay discusiones acerca del tipo de manejo que se debe brindar a los ensayos. Algunos argumentan que el experimento debería someterse a un sistema de manejo mínimo, dado que por lo general ese será el utilizado posteriormente en plantaciones comerciales. Sin embargo, los ensayos de procedencias no son el lugar para probar la capacidad de los árboles de sobrevivir a condiciones de preparación deficiente de sitio o ante total infestación de malezas; se considera que el manejo debe ser tan completo como sea posible para asegurar la máxima sobrevivencia posible del material. No tiene sentido utilizar tiempo y recursos para adquirir las semillas, producir las plántulas y establecer el ensayo para luego perder los árboles antes de que puedan expresar su potencial genético. Posteriormente se pueden diseñar ensayos silvicultores y de validación utilizando las mejores procedencias para estudiar sistemas más

económicos de establecimiento, respuesta a diferentes tratamientos de control de malezas, etc., acorde con las prácticas normales.

Por otro lado, no se debe confundir manejo completo con manejo irreal. Es común observar ensayos que, con el afán de que luzcan bien, son sometidos a prácticas exageradas tales como limpiezas constantes y fertilizaciones excesivas, que enmascaran el potencial real de las procedencias y llevan a interpretaciones engañosas. La tendencia es favorecer la sobrevivencia del material y su expresión genética sin recurrir a prácticas extremas que se salan del patrón lógico de manejo de una plantación comercial. En este aspecto, la palabra clave es representatividad.

### **Documentación**

Todas las etapas en la vida de un experimento deben ser documentadas meticulosamente. La carpeta de un experimento debería contener como mínimo: a) una descripción general del ensayo, que incluya información sobre los lotes de semilla, los objetivos del experimento, los sitios experimentales, los mapas del experimento y prescripciones para el manejo y análisis del ensayo; b) formularios de historia del ensayo, donde se anotan todas a las actividades realizadas a partir del recibo de la semilla, tratamientos en vivero, establecimiento en el campo, etc., y c) formularios de evaluaciones a nivel de semilla, vivero y campo. Se debe tener presente que la vida de un ensayo generalmente se extiende mas allá de la permanencia del personal que lo inicio, de manera que la documentación debe ser suficientemente clara para permitir el análisis y utilización de los resultados por parte del personal que continúe los programas. También se debería mantener en otro lugar separado por lo menos una copia del mapa del experimento; la pérdida de la única copia del mapa experimental por razones de incendio, etc., tendrá el mismo efecto que perder el ensayo mismo por un incendio.

### **Evaluaciones**

Existen tres frases en la vida de un ensayo: semilla, vivero y campo, que son bastantes diferentes para fines de evaluación. Con las dos primeras se busca encontrar características que puedan estar correlacionadas con alguna característica importante en el árbol adulto. Hasta la fecha, sin embargo, no ha sido posible prescindir de la etapa de campo, y es en está donde se pone el mayor esfuerzo. Las evaluaciones pueden continuar por muchos años, al menos hasta la mitad del turno de rotación para la especie. Diferentes especies, objetivos y edades del ensayo afectan el tipo y la intensidad de las evaluaciones.

Las características que se pueden evaluar en un ensayo se ubican dentro de seis categorías diferentes.

- Características del fuste, que incluye altura, diámetro a la altura del pecho (dap), rectitud, bifurcaciones y algunas otras características como grosor de la corteza, circularidad y grano espiral.
- Características de las ramas, que incluyen diámetro, ángulo de inserción, número y distribución.
- Características de la copa, tales como diámetro, forma, simetría y profundidad.
- Características reproductivas, tales como floración y fructificación.
- Características de la madera, como densidad básica y dimensiones de las floras.
- Otras características, como sobrevivencia (que se obtiene normalmente a partir de las mediciones de altura o dap), producción de resinas, efectos de la sequía, viento u otros factores ambientales, resistencia al ataque de insectos, enfermedades y animales mayores, etc.

Para especies maderables, las características del fuste son de primordial importancia ya que pueden cambiar las decisiones acerca de la elección de una u otra procedencia. En especies destinadas a la producción de madera de aserrío, por ejemplo, una procedencia de alta producción de volumen pero con un alto porcentaje de árboles torcidos y bifurcados podría desecharse a cambio de una menos productiva pero de forma excelente.

El propósito de las evaluaciones es describir eficientemente la variación en rasgos de importancia económica que presenta el árbol, que permitan una selección de los mejores individuos y poblaciones, y dichos rasgos variaran de acuerdo con el producto esperado.

Considerando todas las características mencionadas y otras posibles, y que cada característica difiere en importancia con la edad del árbol, el conjunto de posibles mediciones a lo largo de la vida de un ensayo es enorme. El presupuesto y personal disponible son generalmente limitados, de ahí la importancia de realizar unas pocas evaluaciones oportunas de las características de mayor importancia económica, que proporcionen información realmente relevante. No tiene sentido gastar recursos en evaluaciones que al final no tengan utilidad práctica o que proporcionen datos que no puedan ser analizados.

### **Análisis**

El análisis de un ensayo debería realizarse tan pronto como se coleccionen los datos, no solo para evitar la acumulación de trabajo estadístico, sino también porque los resultados pueden sugerir cambios en el manejo del ensayo o el uso inmediato de los resultados. Muchos de estos análisis pueden ser complejos si no se dispone de facilidades de cómputo, pero siempre es posible realizar algunos análisis sencillos, tales como la obtención de las medias, desviaciones

estándar y, si es posible, análisis de varianza y de comparaciones entre medias. Lo que se busca es determinar y explica de manera eficiente las diferencias entre procedencias.

### **Análisis de interacciones genotipo-ambiente (IGA):**

Cuando un experimento se repite en varios sitios, en varios años o bajo tratamientos culturales diferentes, es posible estimar la magnitud de interacción entre las procedencias y el ambiente. Una interacción se da cuando el sitio no afecta todas las procedencias de la misma manera. Esta interacción implica que el comportamiento relativo de las procedencias difiere en ambientes diferentes, y que la mejor procedencia en un sitio puede no ser la mejor en otros. Este análisis es importante para decidir la estrategia de mejoramiento a seguir con una especie.

### **Uso de los resultados**

Una vez identificadas las procedencias superiores, se usa la información de la siguiente manera:

- Se puede recomendar áreas apropiadas para recolectar semilla para su uso operacional en zonas específicas.
- Se puede recomendar áreas (procedencias) donde se debe establecer rodales semilleros para su uso en zonas específicas.
- Se puede establecer plantaciones semilleras de la mejor procedencia para cada zona.
- En la selección de árboles plus, frecuentemente es conveniente poner más énfasis en la selección dentro de las mejores procedencias.

En resumen, la información sirve para planear de una mejor manera tanto las estrategias de mejoramiento a seguir para cada especie como los programas de reforestación comercial inmediatos y futuros.

### **Referencias y literatura consultada**

Barnes, R.D.; Gibson, G.L. 1984. Experimental design, management and selection traits in provenance trials of tropical pines. Presented at joint meeting of IUFRO Working Parties on provenance and genetic improvement strategies in tropical forest trees. Mutare, Zimbabwe, April 1984.

Burley, J.; Wood, P.J. 1979. Manual sobre investigaciones de especies y procedencias con referencia especial a los trópicos. Commonwealth Forestry Instituto, Oxford. *Tropical Forestry Papers* No. 10 & 10A. 297 p.

Cochran, W.G. y Cox G.M. 1957. Experimental design. Wiley, New York, 611 pp.



Commonwealth Forestry Institute. 1984. Field assessment in tropical trees. Presented at joint meeting of IUFRO Working Parties on provenance and genetic improvement strategies in tropical forest tree. Mutare, Zimbabwe, April 1984.

Forest Research Centre. 1984. Layout and establishment. Presented at joint meeting of IUFRO Working Parties on provenance and genetic improvement strategies in tropical forest tree. Mutare, Zimbabwe, April 1984.

Matheson, A.C. (1990). Designing experiments for MPT genotype evaluations. In tree Improvement of Multipurpose Species (Glover, N. y Adams, N. Eds.). Multipurpose Tree Species Network Technical Series, Vol. 2 pp. 55-66.

Mesen, F. 1990. Resultados de ensayos de procedencias en Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie *Técnica, Informe técnico* No. 156. 40 p.

Styles, B.T. 1979. La población base. In Burley, J, y Wood, P. J. (1979). Manual Sobre Investigaciones de Especies y Procedencias con Referencia Especial a Los Tropicós. Commonwealth Forestry Institute, Tropical Forestry Paper No. 10 cLD 10<sup>a</sup>, Department of Forestry, Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford, pp. 15-48.

Valerio, J. 1986. Evaluación de nueve procedencias de *Gmelina arborea* Roxb. En Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR.CATIE. 92 p.

Willian, R.L.; Hughes, C.E.; Lauridsen, E.B. (1990). Seed collection for tree improvement. In Tree Improvement of Multipurpose Species (Glover, N. y Adams, N. Eds.). Multipurpose Tree Species network Technical Series, Vol. 2. Pp. 11-37.

Zobel, B.; Talbert, J. 1984. Applied forest tree improvement. John Wiley and Sons, New York, USA, 505 p.

#### 4.15 Estimación de la ganancia genética

Una manera de estimar la ganancia genética en un programa de mejoramiento es el siguiente:

- Primero, identificar los mejores genotipos (sean clones, procedencias o familias) en un ensayo de campo.
- Segundo, establecer **pruebas de ganancia**. Son ensayos en que se comparan la semilla no mejorada con la mejorada. Normalmente se utilizan parcelas grandes de las diferentes fuentes de semilla (2 o más), replicadas en diferentes condiciones ambientales.

En la práctica, se han implementado muy pocas pruebas de este tipo, por dos razones: primero, son caras y, segundo, cuando las pruebas se han madurado suficientemente para ser evaluadas, el programa normalmente ha avanzado y las fuentes en la prueba de ganancia ya no son utilizadas (Vergara et al., 2004). Una alternativa es estimar la ganancia con base en la superioridad de las fuentes seleccionadas en los ensayos de campo originales. Sin embargo, este método puede sobreestimar las ganancias en productividad.

Otro enfoque es la predicción de la ganancia genética. Las ecuaciones para predecir la ganancia genética son complejas y dependen de la estrategia de selección en uso. Sin embargo, la ecuación básica es la siguiente:

$$R = h^2 S$$

Donde R es la respuesta a la selección, o ganancia genética,  $h^2$  es la heredabilidad y S es el diferencial de selección, el cual se calcula como:

$$S = \mu_s - \mu$$

Donde  $\mu$  es el valor promedio de un rasgo fenotípico de la población antes de selección y  $\mu_s$  = promedio de los árboles seleccionados (Falconer 1989). **S** puede expresarse también como  $i$ , la intensidad de selección, que a su vez se define como un múltiplo de la desviación estándar fenotípica de la población. Existen cuadros del valor de  $i$  para diferentes proporciones seleccionadas (ej. Falconer, 1989).

**S** expresa el grado de superioridad fenotípica de los árboles seleccionados, mientras  $h^2$  indica el grado en el cual esta superioridad se pasa a las descendencias.

#### 4.16 Las ventajas de la clonación de los árboles plus

En un programa de selección clonal, es normal empezar con la selección de árboles plus. Normalmente estos se talan y los rebrotes se cosechan para ser enraizados, formando clones para incluir en las pruebas clonales.

Cuando no es posible talar el árbol, o cuando este no produce rebrotes, existe la alternativa de cosechar semilla del árbol plus y multiplicar clonalmente uno o más de los plantones producidos a partir de la semilla.

Sin embargo, este procedimiento produce menos ganancia genética que la clonación del mismo árbol plus, por dos razones.

Primero, como vimos anteriormente, el valor genotípico tiene dos componentes: el valor de cruce y la desviación de dominancia. La desviación de dominancia

es causada por la interacción entre los alelos específicos que porta cada árbol y es algo específico a cada individuo. El individuo no transmite su desviación de dominancia a sus progenies, sino su valor de cruce, o efecto promedio de los alelos que porta. Si la superioridad de un árbol se basa en una desviación de dominancia muy alta, la única manera de “capturar” esta superioridad sería a través de la clonación (a menos que se pueda repetir el cruce específico que dio origen al árbol en cuestión).

Segundo, al cruzarse con otros individuos, no solo se pierden las interacciones específicas mencionadas arriba, sino que también el polen puede provenir de árboles genéticamente inferiores. Incluso, si el polen es simplemente de calidad “promedio”, se reduce por la mitad la calidad de la progenie en relación al árbol madre (sin considerar el efecto de perder una posible desviación de dominancia positiva).

#### 4.17 LOS HUERTOS SEMILLEROS

A continuación se presenta parte del texto del siguiente documento: Lambeth, C.C. Huertos semilleros. Pp. 93-116 en Cornelius, Mesen y Corea (eds.), 1993. El artículo está orientado principalmente al mejoramiento de pinos tropicales en un contexto industrial. Sin embargo, los puntos cubiertos tienen amplia aplicabilidad.

84

##### Introducción

El retorno de la inversión en la mayoría de los programas de mejoramiento genético, excepto aquellos que se basan en la propagación vegetativa para el establecimiento de plantaciones, es el huerto semillero (figura 8.1). Los huertos semilleros son esenciales para la producción de semilla de alta calidad genética a partir de árboles superiores, seleccionados ya sea de poblaciones naturales, plantaciones o ensayos genéticos de programas de mejoramiento de generaciones avanzadas. El valor del huerto depende de:

- El tamaño del área y el número de hectáreas reforestadas anualmente.
- El incremento de mejoramiento genético (volumen y calidad de las ganancias).
- El valor de la madera.
- La productividad del huerto (kilos de semilla por hectárea).
- El costo de manejar el huerto (costo del kilo de semilla producida).

Es de vital importancia que se incluya en el huerto el mejor material genético disponible y que el huerto sea manejado efectivamente. Existe la impresión errónea de que los huertos son baratos, pero en la mayoría de los casos son

caros de establecer y mantener. La decisión de establecer un huerto no debería tomarse a la ligera, y una vez tomada, debería ir acompañada del compromiso de un manejo intensivo, necesario para una producción eficiente de semilla.

Los huertos son usualmente una buena inversión, pero el retorno de la inversión depende de un manejo eficiente. En cualquier caso, el establecimiento de un huerto debe ser precedido por un análisis financiero que considere los factores mencionados. En muchas áreas de los trópicos los huertos son una inversión excepcionalmente buena, puesto que ellos proveen una fuente de semilla adaptada localmente que no estaría disponible de otra forma. En el caso de las exóticas, los huertos sustituyen la necesidad de importar semilla, que además de cara, puede que no sea genéticamente mejorada.

### ¿Cuándo se debería establecer un huerto?

Se pueden encontrar numerosos ejemplos donde los huertos han sido establecidos ya sea demasiado pronto o demasiado tarde.

Un error común en los trópicos es apresurarse a iniciar un programa de mejoramiento genético antes de la selección cuidadosa de las mejores especies y procedencias. Existen muchos huertos que no se utilizan porque los ensayos posteriores mostraron que otra especie 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 procedencia. En otras palabras, hay que “aprender a caminar antes de correr.”

También se debe estar seguro de que existe una base genética suficientemente amplia del material para selecciones de árboles plus para el huerto semillero o especialmente para el establecimiento de una población para un programa de mejoramiento a largo plazo. En muchos casos, puede haber una base genética suficientemente amplia para establecer el huerto semillero, pero no lo suficiente para establecer una población de cruzamiento que prevenga el apareamiento de individuos emparentados en generaciones posteriores. Las especies nativas raramente representan un problema, puesto que se puede seleccionar el bosque nativo, pero en el caso de las exóticas a menudo se debe empezar con cantidades limitadas de semilla. Un ejemplo típico es *Gmelina arborea*. Muchas plantaciones de esta especie en América Latina se originan de la misma fuente de semilla, que ha pasado de una organización a otra.

Una vez que las mejores especies y procedencias han sido identificadas a lo largo de varios años de evaluación para crecimiento y adaptación, entonces se puede iniciar la selección para los huertos semilleros, cuando existen varias hectáreas de rodales naturales, plantaciones o ensayos que permitan una alta

intensidad de selección (al menos una selección por varios cientos de árboles explorados).

El huerto no debería ser establecido a menos que exista evidencia de que la producción de semilla es posible; la producción no ocurre en todas las áreas de los trópicos.

Algunas organizaciones han tardado demasiado en establecer huertos semilleros, ya sea debido al desconocimiento de los aumentos potenciales en producción y calidad, la falta de capital de trabajo o la falta de capacidad técnica para planear e implementar un programa de mejoramiento genético.

## Huertos semilleros de plantulas y huertos semilleros clonales

Hay básicamente dos tipos de huertos semilleros, los que se establecen con material propagado vegetativamente (usualmente compuestos de varios por cada ortet), y los que se originan de plántulas de semilla (usualmente un ensayo genético).

### **Huerto semillero de plántulas**

Un huerto semillero de plántulas (HSP) se crea mediante un raleo intensivo de un ensayo de descendencias, para abrir las copas lo suficiente para favorecer la producción de semilla. Cuando se efectúa este tipo de raleo en rodales naturales o plantaciones, resulta lo que se conoce como rodal semillero o área de producción de semilla.

La ventaja aparente del HSP es que la evaluación de las descendencias y la producción de semilla se pueden llevar a cabo en el mismo sitio. Sin embargo, los ensayos de descendencias se establecen normalmente en sitios típicos de reforestación, los cuales no siempre son adecuados para la producción de semilla. La otra ventaja del HSP es que la producción de semilla se inicia antes (para una generación dada), los árboles de un ensayo y el establecimiento subsiguiente del huerto. Si el ensayo de descendencia tiene una área basal alta, puede pasar varios años para que se formen copas favorables para la producción de semilla, y puede que la producción no se inicie mucho antes que en un huerto semillero establecido por injertos.

### **Huertos semilleros clonales**

Los huertos semilleros clonales (HSC) se establecen colocando varios ramets (producidos por injertos, estacas enraizadas o acodos) de cada árbol seleccionado en un área escogida para la producción de semilla.

Los HSC tienen dos ventajas principales: los sitios para el huerto no están restringidos a las áreas apropiadas para ensayos y 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 únicamente un pequeño número de selecciones se incluyen en el huerto (alrededor de 30), mientras que es necesario dejar mas árboles por hectárea en los HSP para una polinización adecuada. Aun mas, las selecciones para un HSC pueden provenir de varios sitios de prueba, mientras que los HSP usualmente se crean a partir de solo uno o dos sitios (para una generación de cruzamiento dada).

Para aquellas organizaciones que colectan y mantienen la semilla por árbol individual, el HSC hace posible colectar cantidades comerciales de varios ramets. Estas colecciones de semilla de polinización abierta de madres individuales resultan en plantas en vivero y en plantaciones mas uniformes, con menos pérdidas debidas a la supresión de los árboles más pequeños. Los estudios han mostrado que la mezcla de familias (descendencias) en el vivero resulta en perdidas diferenciales de familias en el vivero debidas a sus diferencias aparentes en germinación y curvas de crecimiento. Algunas familias son de rápido crecimiento inicial y pueden dominar a otras que empiezan tarde, pero que podrían ser de más rápido crecimiento después.

Los HSP usualmente son fuentes alternativas de semilla mientras se desarrollan los HSC. El mayor énfasis en este documento se dará a los huertos semilleros clonales.

## Selección del sitio para el huerto

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.

La información más importante en el proceso de decisión es la producción de conos y semillas de los árboles en el área bajo consideración. Se deberían realizar estudios sobre la cantidad y calidad de la semilla producida. Un área con conocida capacidad de producción de semilla debería tener mucha mayor prioridad que un área no probada, aun si esta última tiene otras ventajas como mejor accesibilidad y facilidad de manejo. Algunos rodales producen cantidades inusualmente grandes de semilla como respuesta al estrés severo, el cual puede ser dañino para el huerto a largo plazo. Estos sitios deberían ser evitados. Una fuerte producción de conos no significa necesariamente una fuerte producción de semillas. *Pinus caribea* a menudo produce cosechas abundantes de conos que tienen poco o nada de semilla. Siempre es necesario un conteo de semillas llenas y vacías.

Tanto la longitud como la latitud pueden ser críticas en la producción de semilla. *Pinus patula* típicamente no produce conos ni semillas a bajas elevaciones. En Colombia, a 3°N de latitud, las flores abortan a elevaciones inferiores a los 2000 msnm. Arriba de esta elevación, la producción de conos aumenta hasta los 3000 m. La precocidad a menudo debería ser un criterio tan importante como la producción de semilla por hectárea, puesto que la velocidad a la cual se produce material genéticamente mejorado para las plantaciones juega un papel determinante en un programa de mejoramiento genético. *Pinus caribea* produce semillas mejores y de forma más consistente a latitudes mayores de aproximadamente 13°. A latitudes menores, la producción de semilla puede aumentar con la elevación, dentro de ciertos límites, y/o estaciones secas y lluviosas bien definidas.

El clima puede también afectar la producción de semilla en formas diferentes. Los pinos a menudo producen mejores cosechas de semilla en áreas con estaciones secas y lluviosas bien definidas. Las razones no están claras, pero existen dos hipótesis: a) la diferenciación de yemas vegetativas a sexuales puede requerir un periodo de dormancia (en climas templados esta dormancia es producida por: las estaciones), el cual puede ser inducido por el estrés hídrico y/o calor; b) en estos climas, las flores tienden a emerger todas aproximadamente al mismo tiempo, lo cual favorece una polinización más efectiva debido a la existencia de una fuerte nube de polen cuando las flores femeninas están receptivas. Los climas favorables para crecimiento a lo largo de todo el año generalmente son inadecuados para la producción de semilla.

Los huertos no deberían ser establecidos en condiciones inusualmente nubosas o neblinosas. La luz del sol, como lo evidencia el amplio espaciamiento de los árboles en el huerto, es crítica. Las áreas con vientos lo suficientemente fuertes para deformar los árboles también deberían ser evitados. En áreas de vientos persistentes, las barreras cortavientos pueden ser útiles.

Siempre que sea posible, los huertos no deberían ser establecidos en pendientes fuertes. Los terrenos planos o de pendientes moderadas facilitan y bajan los costos de manejo y de cosecha. Muchas prácticas de manejo del huerto tales como combate de malezas, fertilización, subsolado y cosecha deberían mecanizarse, lo cual sería imposible en terrenos de pendiente fuerte.

Siempre que sea posible, el huerto debería ser ubicado en áreas convenientes y de fácil acceso para visitas y observación frecuente. El fácil acceso para mostrar el huerto al grupo gerencial puede ser muy importante para obtener apoyo para el programa de mejoramiento, pero algunas veces esto no es posible cuando se hace necesario establecer el huerto lejos de la base para lograr la producción de semilla.

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 utilizara la semilla, a fin de lograr la producción de suficiente semilla a bajo costo. En el pasado se ha puesto demasiado énfasis a ubicar el huerto en un lugar cercano, con poca consideración en la producción de semilla. En muchos casos será necesario adquirir nuevas tierras apropiadas para los huertos.

Los huertos de una procedencia dada no deberían ser ubicados en áreas de rodales naturales extensivos o plantaciones de otra procedencia que pueda polinizar el huerto, y por lo tanto, alterar la adaptabilidad y el crecimiento de la descendencia colectada del huerto. Asimismo, los huertos de procedencias o zonas ecológicas diferentes no deberían ser establecidos contiguamente.

El tipo apropiado de suelo dependerá de la especie en particular, aunque para la mayoría de las especies es deseable un suelo limoso profundo o limo-arenoso sobre subsuelo arenoso arcilloso. Los suelos muy arcillosos son fácilmente compactados por el tráfico pesado o el equipo comúnmente utilizado en la mayoría de los huertos. El buen drenaje es una necesidad absoluta para la producción de semilla de la mayoría de las especies, no importa cuál sea la textura. Se debería determinar y considerar el rango de pH apropiado para la especie.

Establecer un huerto en tierras agrícolas de buena calidad bien puede justificar el precio, puesto que se garantiza el buen crecimiento y sanidad del huerto y se facilita el manejo.

Un huerto establecido en el centro del rango natural de la especie o entre plantaciones extensivas de la misma especie tendrá un alto riesgo de contaminación, ya que polen inferior entrara al huerto y fertilizara un porcentaje significativamente alto de flores receptoras. Los estimados de encontrar niveles de 33 a 75% en huertos localizados cerca de rodales de la misma especie. La mayor contaminación ocurre en huertos jóvenes que pueden estar produciendo flores femeninas pero muy poco polen.

Las áreas potenciales para el huerto deberían evaluarse para determinar peligros potenciales. Muchos huertos se han perdido 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.

Se debe asegurar, sin lugar a dudas, que la especie está adaptada a la zona. Si un sitio potencial para el huerto se encuentra en una zona donde la especie no ha sido plantada antes, se deben estudiar otros factores – geográficos, climáticos, edáficos, etc. – para que quede poca duda de la adaptación de la especie.



## Tamaño del huerto

Un tamaño inadecuado del huerto resultara ya sea en escasez de material plantable de alta calidad o en altos costos por kilo debido al exceso de tamaño. Sin embargo, es mejor tener un exceso, puesto que este probablemente pueda ser comercializado. En la mayoría de los programas nuevos de mejoramiento, hay mayor demanda que suministro de semilla de alta calidad. En realidad, algunos huertos están intencionalmente diseñados para suplir el mercado externo. En algunos casos, la vena de semilla puede ser un negocio lucrativo que puede ayudar a recuperar algo de los costos del establecimiento y mantenimiento del huerto. Además, muchos de los costos del huerto son fijos o varían poco con el número de hectáreas establecidas.

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 adoptara. 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:

- Hectáreas que serán plantadas cada año (promedio y máxima anual)
- Densidad de plantación
- Numero de semillas por kilos
- Eficiencia del vivero en términos de numero de plántulas buenas producidas por kilo de semilla
- 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.

Cualquiera que sea el cálculo de las hectáreas necesarias para el huerto, debería haber un mínimo de aproximadamente 3 hectáreas en un diseño compacto para asegurar una polinización adecuada en especies de polinización por el viento. Igualmente, no se debería establecer huertos pequeños en diseños de franjas largas, ya que esto puede ocasionar que el polen abandone el huerto con los primeros vientos. La polinización más efectiva se logra mediante una forma adecuada y la consideración de la dirección de los vientos predominantes,

si estos son predecibles. De lo contrario, el huerto debería ser tan cuadrado como sea posible.

Cuando se busca el sitio, se debería dejar una barrera de aislamiento sin árboles de por lo menos 200 metros entre el huerto y los rodales cercanos de la misma especie u otras especies con las cuales el huerto podría hibridizar, de manera que el huerto no sea completamente invadido por polen externo. El aislamiento permite que el polen externo se asiente y no llegue al huerto. Si hay árboles de una especie incompatible creciendo en la zona de aislamiento, entonces la franja debe ser más ancha – 350 metros – para especies de polinización por viento. Es preferible ubicar el huerto bien lejos de rodales contaminantes. Una simple trampa de polen en el área potencial para el huerto puede proporcionar datos sobre el nivel de contaminación potencial (figura 8.2).

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. La mayoría de los huertos se establecen a un espaciamiento de 5x5m o 10x10m. También se utilizan espaciamientos menores en los casos donde la información sobre la descendencia de los padres incluidos en el huerto estará disponible poco tiempo después del establecimiento del huerto. La información sobre la descendencia puede utilizarse para remover los padres inferiores y reducir efectivamente el número de árboles por hectárea.

Los árboles superiores para el huerto pueden ser propagados vegetativamente mediante estacas enraizadas, injertos o acodos.

### **Estacas enraizadas**

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, gmelina, 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 la corta 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 se han seleccionado varios cientos de árboles, entonces unas cuantas pérdidas no son críticas.

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.

Algunas veces es posible enraizar estacas, pero el sistema radical resultante puede ser inaceptable (pocas raíces o sistemas radicales en un solo lado, sin raíces pivotantes). Antes de usar este material para huertos semilleros, hay que asegurarse de que existe suficiente experiencia con la especie para verificar la adaptabilidad y el hábito de crecimiento de las estacas enraizadas.

### **Injertos**

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 insectos 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. Algunas especies, tales como *Pinus patula*, son más susceptibles a este problema que otras y se puede observar una considerable mortalidad aun después de uno o vanos años.

### **Acodos aéreos**

Los acodos aéreos algunas veces pueden ser exitosos en especies que son difíciles de enraizar o injertar. El éxito de esta técnica se origina del hecho de que el material a enraizar permanece intacto y recibe agua del ortet, al mismo tiempo que el área de iniciación de raíces permanece húmeda. Los acodos aéreos se utilizan raramente y, una vez más, se debe tener cuidado de que el sistema radical resultante sea adaptable a las condiciones de campo.

### **Diseño del huerto**

La siguiente información es necesaria al diseñar un huerto semillero:

- Numero de clones
- Espaciamiento inicial, determinado por:
  - Velocidad de crecimiento
  - Edad a la cual el ensayo genético permitirá el raleo
  - Vida útil del huerto
  - Mapa del área con las posiciones marcadas
  - Distancia mínima permisible entre ramets del mismo clon
  - Un programa de cómputo si se utiliza un diseño; al azar

La distribución más común de los clones en un huerto es al azar, con un *mínimo* de aproximadamente 30 metros entre ramets del mismo don. 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 insectos.

Un diseño 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 buenos puede ser necesario remover algunos ramets simplemente para dejar entrar la luz. Esto ocurre con menos frecuencia en los diseños al azar.

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 ramets del mismo clan. Otra ventaja del diseño sistemático es que logra un balance casi perfecto en términos de número de ramets 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 ramets 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 ramets de un clan 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 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 ramets por clon debido a la mortalidad y los raleos. Los huertos pequeños con un gran número de clones tendrán pocos ramets por clon, lo cual hará difícil colectar y plantar separadamente por clon. La mayoría de los huertos deberían contener no más de 50 a 70 clones antes del raleo a un espaciamiento inicial de 5 x 10 m, o 30 a 40 clones a un espaciamiento de 10 x 10 m.

**Cuadro 8.1.** Número de ramets por clon en un huerto de 4 hectáreas

Espaciamiento inicial	Número de clones					
	20	40	50	60	70	80
5x10 (800 árboles)	26	20	16	13	11	10
10x10 (400 árboles)	13	10	8	6	5	5

Se deberían usar espaciamientos menores cuando:

- El huerto tiene una vida útil corta
- La información sobre el desempeño de la descendencia se obtendrá en poco tiempo para el raleo del huerto.
- Los árboles crecen muy lentamente y producen semilla antes del inicio de la competencia entre copas.

La tendencia en el pasado ha sido plantar los huertos a densidades demasiado altas que requerían demasiados raleos antes de obtener cualquier información de los ensayos de descendencias.

Los huertos deberían ralearse tan pronto se inicie la competencia entre copas, con el objetivo de mantener al menos tres lados de la copa abiertos a la luz. Los retrasos en el raleo pueden retrasar varios años la producción de semilla. Basta notar que en plantaciones densas no hay producción de semillas.

### Manejo del huerto

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 manejo del huerto es complejo y relativamente desconocido para especies nuevas de los trópicos. El manejo deberá adaptarse a cada especie en particular: Es aconsejable consultar con especialistas en materias como fertilización, irrigación, protección contra insectos y control de la vegetación. Sin embargo, es posible hacer algunos comentarios generales sobre las prácticas más comunes de manejo.

### **Fertilización**

La fertilización es ampliamente utilizada para mantener las condiciones sanitarias del huerto y para promover la floración. Al principio, se puede agregar un fertilizante balanceado y posteriormente dosis grandes de nitrógeno, para estimular una buena producción de flores. En huertos antiguos de pino; en el sureste de los Estados Unidos, se están aplicando hasta 165 Kg. por hectárea.

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. En general, para la mayoría de las especies, la fertilización debería hacerse justo antes de la iniciación de las yemas sexuales. También se deberían conducir estudios sobre dosis de fertilización.

### **Irrigación**

Generalmente la irrigación es necesaria durante los primeros años para asegurar una alta sobrevivencia y promover el crecimiento inicial. 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. Aun más, se ha mostrado que un estrés hídrico moderado puede inducir la floración en pinos y que los niveles de estrés requeridos no ocurren con irrigación. Se cree que el beneficio de la irrigación temprana es el lograr copas grandes con más sitios potenciales para la floración debido al aumento en la ramificación.

### **Subsolado**

Los suelos con capas horizontales duras (“hard pan”) o aun ligeramente compactados deberían ser subsolados en dos direcciones antes de establecer el huerto, plantando los árboles en las intersecciones (o a un lado del lomillo si existe el peligro de drenaje pobre temporalmente alrededor del árbol).

El subsolado también se utiliza para romper la compactación originada por el paso frecuente de equipo pesado Existen estudios que indican que el subsolado puede también aumentar la floración al mejorar las condiciones sanitarias del huerto y posiblemente, al inducir algo de estrés hídrico. Se debe buscar asesoría para realzar el subsolado, especialmente con relación a la frecuencia

y a la distancia de los árboles. Cuando se realice, siempre debería colocarse un disco vertical adelante del subsolador, para cortar las raíces de otra manera, las raíces largas pueden ser reventadas y sacadas a la superficie.

Los patrones de pérdida de dominancia apical, de condiciones sanitarias pobres y de rutas de tráfico pesado pueden ser indicadores de la necesidad del subsolado.

### **Manejo de la vegetación de cobertura**

Es deseable mantener una buena vegetación de cobertura en el huerto para prevenir la erosión, mejorar las condiciones para el paso del equipo y reducir la compactación. Sin embargo, la selección de la planta (usualmente una gramínea) es crítica, algunos pastos son altamente alelopáticos a ciertas especies de árboles. Además, algunas coberturas de pastos pueden competir con los árboles por agua y nutrientes y reducir la efectividad de insecticidas aplicados al suelo. Los huertos en pendientes deben tener cierta vegetación de cobertura para prevenir la erosión.

La vegetación de cobertura no debe dejarse crecer demasiado, y se necesitan limpiezas frecuentes. Se podría aplicar herbicidas en franjas a lo largo de las filas de árboles, con tres ventajas: a) la controla en una sola dirección reduce el tráfico y la compactación, b) se reducen grandemente los daños por la desbrozadora y el tractor y c) se reducen los costos de control de malezas.

### **Podas**

Tan pronto como el injerto es 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.

Conforme los árboles crecen, se necesitan 4 podas para facilitar las chapeas y otras actividades. Las heridas de las podas pueden ser una fuente de infección de muchas enfermedades. La poda no deberla ser excesiva, ya que esto puede promover el crecimiento vegetativo y no la actividad sexual y debilitar al árbol si se remueve un gran porcentaje de la copa viva. Las ramas siempre se deben cortar a ras del fuste con una sierra de podar.

### **Combate de insectos y enfermedades**

Sería imposible cubrir los miles de insectos y enfermedades específicos al gran número de especies que se plantan en los trópicos. Es necesario realizar un estudio de las plagas potenciales de la especie en particular y evaluar el peligro de un ataque en el huerto, para estar preparado para prevenirlo o combatirlo adecuadamente. Se deben consultar entomólogos, fitopatólogos y especialistas en huertos semilleros en relación con los posibles daños.

Los encargados del huerto deberían estar conscientes de que los insectos de las flores y los frutos pueden reducir la producción dramáticamente e incluso así destruir la cosecha. Se debería conducir estudios sobre niveles poblacionales y del ciclo de vida de los insectos potencialmente más peligrosos, para aprender la manera de combatirlos.

Algunas enfermedades tales como la pudrición de la raíz pueden entrar por los cortes frescos de los tocones durante los raleos.

Estas enfermedades se propagan luego a través de las raíces. La aplicación de Borax inmediatamente después del corte puede prevenir la infección. Los árboles deberían cortarse durante los periodos de baja incidencia de esporas en el aire, cuando esto se conoce.

### **Cosecha**

El método de cosecha dependerá de la especie en particular. Es absolutamente imperativo estudiar la biología reproductiva en la literatura y en publicaciones sobre métodos de cosecha. Métodos inadecuados de colecta y procesamiento pueden destruir la cosecha la madurez de la semilla es esencial. En los pinos, hay un período muy corto entre madurez de la semilla y apertura del cono, con el vuelo subsecuente de la semilla. Los conos deben ser cosechados cuando se alcance la gravedad específica adecuada, la cual depende de la especie. El volumen del cono se puede determinar fácilmente mediante la inmersión en agua en un cilindro graduado. El tiempo de cosecha no es tan crítico en los pinos de cono cerrado.

### **Polinización y cruzamiento**

Muchos huertos semilleros de producción, y ciertamente de cruzamiento, se utilizan para realizar cruces controlados para ensayos de descendencias. Los métodos de polinización controlada han sido publicados para la mayoría de las especies forestales comerciales. Usualmente es esencial que la flor femenina sea cubierta antes de entrar en el periodo de receptividad; por lo tanto, se debe tener conocimiento de los estados de desarrollo floral y de fonología de la floración.

El procesamiento inadecuado del polen puede matarlo. Se deberían utilizar técnicas apropiadas de procesamiento y almacenamiento del polen si se quieren obtener resultados aceptables.

El polen debería aplicarse a las bolsas al momento de máxima receptividad de las flores femeninas y las bolsas se remueven solo después de que haya pasado el periodo de receptividad.



## **Introducción de la floración**

En un intento por acelerar el tiempo a la floración y acortar el ciclo de cruzamiento y evaluación, se ha desarrollado un número de técnicas para promover la floración temprana. Se ha demostrado que aun plantas muy jóvenes, que se supone que están sexualmente inmaduras, pueden ser forzadas a producir flores. Los tratamientos más comunes son la aplicación de ácidos giberélicos, estrés hídrico moderado y anillamiento parcial del fuste principal o de las ramas. Estas técnicas se aplican principalmente a plantas en potes, pero las giberelinas y el anillamiento pueden aplicarse también bajo condiciones de campo.

## **Polinización masal suplementaria**

Una de las prácticas más recientes en los huertos semilleros es la colección de polen a escala masal y su aplicación a las flores femeninas del huerto. Hay básicamente dos objetivos para esto:

- a) Aumentar la producción de semillas, especialmente en huertos jóvenes, donde puede haber flores femeninas pero muy poco polen. Esta práctica puede ser particularmente importante en los trópicos, donde las flores se producen todo el año y nunca existe una gran nube de polen, como ocurre en el rango natural de la especie. Se pueden producir cantidades pequeñas a lo largo del año, pero posiblemente insuficientes como para fertilizar completamente todas las flores femeninas.
- b) Aumentar la ganancia genética mediante la colección de polen de padres que han probado ser genéticamente superiores y su aplicación a un grupo escogido de flores femeninas. Si esto es completamente exitoso, se podrían crear familias de hermanos completos comprobadas para plantaciones comerciales, aumentando así la uniformidad, la calidad y la productividad de las plantaciones. Usualmente no es posible lograr un 100% de éxito en la fertilización si hay competencia con polen traído por el viento; sin embargo, la polinización suplementaria puede aumentar significativamente la ganancia genética y, en muchos casos, posiblemente también la producción de semilla. Para estas actividades es imperativo que el polen sea de la mejor cantidad posible a *fin* de que pueda competir exitosamente con polen no procesado que aparezca en el huerto.

## **Referencias**

- Dorman, K.W. 1978. The genetics and breeding of the southern pines. USDA Forest Service Agricultura. Handbook No. 471)
- Scmidtling, R.C. 1975. Fertilizer timing and formulation affect flowering in a loblolly pine seed orchard. Thirteenth Southern Forest tree Improvement Conference. Raleigh, North Carolina.

## 4.18 APENDICE SOBRE INJERTACIÓN

(Notas suministradas por Dr. J.B. Jett y Dr. B.J. Zobel, North Carolina State University)

La injertación es exitosa o no, dependiendo de:

- a) 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.
- b) 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.
- c) 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.
- d) 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.
- e) Especie. Hay grandes diferencias entre especies con respecto al éxito del injerto.
- f) 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.

### Materiales para la injertación

Los suministros necesarios para la injertación pueden adquirirse de viveros o casas de suministros forestales. Los materiales necesarios se muestran en la siguiente lista:

1. Cuchilla de injertar
2. Cintas de injertar
3. Piedra de afilar cuchillas
4. Tijeras de podar

## 4.19 ENSAYOS DE DESCENDENCIAS

A continuación se presenta parte del texto el siguiente documento: Lambeth, C.C. Ensayos de descendencias. Pp.11 7-133 en Cornelius, Mesen y Corea (eds.1. 1993).

El artículo está orientado principalmente al mejoramiento de pinos tropicales en un contexto industrial. Sin embargo, los puntos cubiertos tienen amplia aplicabilidad.

### Objetivos de los ensayos de descendencias

Los ensayos de descendencias pueden tener uno o varios posibles objetivos, algunos de los cuales serán cubiertos por este documento, pero el propósito primordial es aumentar las ganancias genéticas de un programa de mejoramiento, para la generación actual y las siguientes. Se pondrá énfasis en este último objetivo.

#### **Estimación del valor de cruce y de la aptitud combinatoria específica.**

La selección de árboles superiores en rodales naturales o plantaciones resulta en ganancias genéticas significativas (especialmente en rectitud), pero la experiencia ha demostrado que la evaluación de las descendencias de estos árboles no sólo vale la pena, sino que usualmente proporciona los mayores incrementos en ganancias genéticas de un huerto semillero.

Con respecto al valor de un progenitor en particular, se puede obtener dos clases de información (cuadro 9.1): 1) la aptitud combinatoria general (ACG), que se refiere al valor de la descendencia de un progenitor cuando ha sido cruzado con todos los demás o varios otros progenitores, y 2) la aptitud combinatoria específica (ACE), que se refiere al comportamiento de la descendencia de cruces específicos entre dos progenitores especialmente en el sentido de si su comportamiento es mejor o peor al que se esperaría de acuerdo a la ACO de los dos padres (cuadro 9.1).

**Cuadro 9.1.** El cálculo de aptitudes combinatorias generales (ACG) y específicas (ACE) y el valor de cruce (IC) para un diseño de cruzamiento factorial.

Padres	A	B	C	D	Promedio	ACG	VC
E	10	14	8	12	11	0	11
F	12	16	10	14	13	2	15
G	8	8	6	10	8	-3	5
H	14	18	12	16	15	4	19
I	16	20	14	18	17	6	23
J	10	16	8	14	12	1	13
K	6	12	4	10	8	-3	5
L	12	16	8	8	11	0	11
M	8	12	6	10	9	-2	7
N	4	8	4	8	6	-5	1
<i>Promedio</i>	10	14	8	12	11		
ACG	-1	3	-3	1		0	
VC	9	17	5	13			11

ACE de la cruce BxJ =  $BxJ - VC(B) + VC(J) / 2$

$$= 16 - ((17 + 13) / 2) = 1$$

ACE de la cruz BxG =  $BxG - (VC(B) + VC(G)) / 2$

$$= 8 - (17 + 5) / 2 = -3$$

La suma de las ACEs = 0

La ACG es importante en programas que utilizan semilla de huertos de polinización abierta, donde cada padre se cruza con varios otros padres. Matemáticamente la ACG es la desviación de la descendencia de un progenitor particular de la media general de la descendencia de todos los progenitores. Un concepto de gran importancia; a menudo omitido, es el valor de cruce (VC) (tabla 9.1). El valor de cruce (diferencial) es el doble de la ACG. Cuando un progenitor es cruzado con varios otros al azar, contribuye sólo la mitad de sus genes en la descendencia resultante y por lo tanto, cualquier superioridad o inferioridad de esta descendencia, representa únicamente la mitad del valor del padre para propósitos de mejoramiento. El valor de cruce generalmente se expresa en unidades reales, sumándolo a la media general.

La ACE es importante en programas que producen cruces específicos para producción comercial. Se puede utilizar la polinización masal suplementaria para producir cruces específicos a escala masiva, pero el enfoque más común es producir una pequeña cantidad de semilla de un cruce específico mediante el aislamiento de las flores en bolsas de polinización, para multiplicar luego la

descendencia mediante la propagación vegetativa. La ACE es la desviación de un cruce particular de los VC promedio de los dos progenitores, tales desviaciones se originan de los efectos positivos o negativos de combinaciones específicas de genes en la descendencia.

Un árbol no hereda su genotipo a la descendencia; hereda sus genes. El genotipo no es únicamente el conjunto de genes, sino la combinación particular de alelos y genes en los varios cromosomas. Esas combinaciones se rompen durante la meiosis (división sexual de las células). Si un padre tiene genes deseables o no deseables, en promedio, el efecto se reflejará en la descendencia. Estas diferencias entre descendencias (cuando el progenitor es cruzado con varios otros) se denominan el efecto aditivo o varianza aditiva, porque son efectos acumulativos de “genes deseables o no deseables”. La varianza aditiva se debe a los efectos de la ACG.

Por otro lado, dos progenitores específicos producirán una alta frecuencia de combinaciones específicas de genes, que resultarán en un comportamiento diferente del esperado de acuerdo al efecto aditivo de sus genes. Esta aptitud combinatoria específica es causada por la acción de alelos dominantes en varios locus, o entre locus, y por lo tanto, resulta en la varianza de dominancia. La varianza de dominancia se debe a los efectos de la ACE. La clonación preserva el genotipo y las diferencias entre clones se deben a los efectos aditivos (una colección de genes deseables o no deseables) y a los efectos genéticos de dominancia (debidos a combinaciones únicas de genes).

La mayoría de los programas de mejoramiento genético se inclinan a utilizar la ACG porque los genes (no las combinaciones de genes o los genotipos) son transmitidos de una generación de mejoramiento a la siguiente. La ACE es importante en, propagación comercial y/o familias de hermanos completos. Dependiendo del objetivo, el ensayo de descendencias debería cumplir bien las funciones de estimación de la ACG y/o la ACE.

### **El raleo genético del huerto**

El raleo genético del huerto se logra mediante la evaluación de las descendencias de los padres incluidos en el huerto y la remoción de los padres inferiores. Esto se puede lograr mediante la colección de semilla de polinización abierta del huerto para evaluación, o mediante la realización de cruza controladas en una forma que proporcione buena información de los valores de cruce.

### **Estimación de la heredabilidad**

En las estimaciones de la ganancia genética es necesario conocer el grado de heredabilidad de la superioridad observada de los individuos seleccionados, o el valor de cruce de los padres. La heredabilidad es el ratio de la varianza genotípica (usualmente la varianza genotípica aditiva) respecto a la varianza

total. Los ensayos deben diseñarse de tal manera que permitan una estimación precisa de este ratio, puesto que este se necesitará para calcular la ganancia genética. Los ensayos de campo y de cruzamiento son muy importantes en este contexto. Generalmente, un ensayo diseñado para estimar las varianzas con precisión, requiere un diseño más riguroso que uno diseñado simplemente para estimar las medias de las descendencias. Sin embargo, usualmente es posible diseñar un estudio que estime tanto los valores de cruce como la heredabilidad con buena precisión.

Algunas veces, los ensayos genéticos son diseñados para examinar la distribución (entre procedencias, entre efectos de elevación o latitud, efectos de rodal a rodal o efectos entre árboles individuales en un rodal) de la variabilidad genética de una población (incluyendo la heredabilidad) y no están ligados necesariamente a programas de mejoramiento genético. El diseño de tales ensayos dependerá de los objetivos específicos.

### **La base para selección de la nueva generación**

Los ensayos genéticos proporcionan una población a partir de la cual se seleccionan árboles superiores para la siguiente generación de cruzamiento y evaluación. Estos ensayos deben proporcionar una base genética amplia para el cruzamiento de varias generaciones, sin la endogamia severa que resulta del cruzamiento entre parientes cercanos. Las cruces controladas proporcionan información sobre el pedigrí, lo que hace posible controlar en cierto grado los niveles de endogamia. El número de padres y el patrón de cruzamiento son muy importantes para asegurar el mantenimiento de una base genética amplia, al mismo tiempo que se obtiene una ganancia genética significativa a través de la selección en generaciones futuras.

### **Estimación de la ganancia sobre el testigo comercial**

El progreso resultante del mejoramiento genético debe juzgarse contra algún lote estándar (un testigo). El testigo es usualmente una colección general de semilla no mejorada de varios árboles de la procedencia bajo mejoramiento. En muchos programas, ha habido un manejo deficiente de los lotes testigo; para que el testigo sea eficiente, es necesario:

- a) Documentar la información exacta de la procedencia, la fecha de recolección y el número de árboles incluidos en la recolección.
- b) Asegurarse de que habrá un suministro de semillas del mismo lote por muchos años.

Muchas veces los testigos utilizados en los primeros ensayos no pueden conseguirse posteriormente porque la fuente ya no existe o porque no existe suficiente información para localizarla.

- c) Asegurarse de que habrá un número suficientemente grande de árboles testigo en el ensayo que permitan una estimación precisa de la media, puesto

que esta será la base para juzgar el progreso. Algunas veces se incluyen lotes testigos adicionales en el ensayo para asegurar la precisión necesaria.

- d) En generaciones avanzadas de evaluación, se debería incluir un lote de material mejorado de generaciones previas.

### **Estimación de productividad**

En algún momento será necesario establecer ensayos para estimar la productividad por hectárea de las mejores familias. Puesto que estos ensayos requieren parcelas grandes (generalmente 1000 a más árboles por parcela) y áreas grandes, no son recomendables para evaluación cuando están involucrados varios cientos de cruces. Los ensayos de productividad son necesarios para obtener los parámetros para la construcción de modelos de crecimiento y productividad, los cuales se utilizan para obtener estimados más precisos de la ganancia genética, tales ensayos deberían estar bien repetidos y bien diseñados.

### **Demostración**

El valor demostrativo de los ensayos ha estado descuidado en muchos programas de mejoramiento forestal, algunos de los cuales han perdido la fuente de financiamiento debido a la incapacidad de mostrar a los donantes que existen suficientes diferencias entre el material mejorado y el no mejorado. Estos ensayos deben contener parcelas extensas y contiguas para maximizar el efecto visual del contraste. Deberían colocarse en áreas convenientes para el acceso de visitantes. No se necesita un gran número de repeticiones. Las parcelas pequeñas utilizadas para la evaluación de un gran número de familias no son tan convincentes como las parcelas grandes, lo que hace necesario el establecimiento de estas últimas. Los objetivos de demostración y estimación de productividad pueden combinarse en un solo ensayo.

## **4.20 Análisis financiero del mejoramiento**

Los análisis financieros del mejoramiento genético forestal, comparan el costo marginal de la semilla mejorada con los ingresos marginales y ahorros generados por su uso. Esencialmente, el costo marginal es la diferencia entre el costo del programa de mejoramiento y los costos de producir semilla por sin programa de mejoramiento vías alternativas.

El costo es relativamente fácil de estimar. Los ingresos marginales dependen de la ganancia genética (aumento en productividad o calidad), el valor monetario por hectárea de esta ganancia, y el número de hectáreas de plantación establecidas en cada año de producción del huerto semillero, jardín clonal, etc. El establecimiento de plantaciones mejoradas a lo largo de varios años genera una secuencia de  $n$  ingresos marginales, donde  $n$  es el número de años

de operación del huerto semillero. Se calcula el valor neto presente de esta secuencia de ingresos, así como de los costos, y de esta manera se derivan valores de los indicadores financieros como TIR<sup>1</sup>, VAN<sup>2</sup>, RBC<sup>3</sup>, etc. La estimación de los ingresos marginales es problemática porque requieren supuestos sobre acciones futuras, así como proyecciones sobre la ganancia genética. Es por eso, que en algunos casos, los estudios se han dedicado a calcular una ganancia genética mínima que justificaría la inversión, en lugar de estimar el TIR, VAN, etc. A continuación (ver cuadro), se resumen algunos resultados de estudios financieros de la mejora genética.

Cabe mencionar que en general los estudios omiten varios beneficios adicionales, ej. el ahorro en el costo de la colecta de semilla, la mayor calidad fisiológica de la semilla, los ahorros en costo de mantenimiento.

En general las ganancias serían mayores en el caso de las especies tropicales, porque son de más rápido crecimiento y por lo tanto los costos de interés pesan menos. Las ganancias financieras son más probables si las especies consideradas por el programa tienen una aplicación masiva y una ganancia genética amplia.

---

<sup>1</sup> TIR (Tasa Interna de Retorno), indicador de la rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR, mayor rentabilidad.

<sup>2</sup> VAN (Valor Actual Neto), permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos futuros de caja, originados por una inversión.

<sup>3</sup> RBC (Relación Costo Beneficio), se basa en el principio de obtener los mayores y mejores resultados con el menor esfuerzo invertido. Los actos en los que los beneficios superan el costo son exitosos, en caso contrario fracasan. El RBC no actualiza costos, por lo tanto su aplicación es limitada para plazos largos mayores de 10 años.



Cuadro 9.2. Resultados financieros del mejoramiento genético forestal.

Especies	Indicador	Resultado	Referencia
<i>Pinus ponderosa</i>	Ganancia genética necesaria <sup>1</sup>	6,3 %	Ledig y Porterfield, 1981
<i>Pinus</i> spp. (varios)	TIR	11,5 – 20,0 %	Swofford y Smith, 1972
<i>Pinus taeda</i>	TIR	8 – 14 %	Porterfield, 1975
<i>Pinus taeda</i>	TIR	14,3 – 18,7 %	Anon, 1983
<i>Pinus taeda</i>	Ganancia genética necesaria <sup>1</sup>	3 – 6 %	Bergman, 1967
<i>Pinus caribaea</i>	TIR	15,2 %	Reily y Nikles, 1977
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	VPN 5%	GBP 28.000	Morgan, 1979
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Ganancia genética necesaria <sup>1</sup>	1,0 – 1,2	Ledig y Porterfield, 1981
<i>Picea mariana</i>	RBC	0,41 – 1,2	
<i>Picea galuca, Picea rubra</i>	RBC	4,2 – 14,0	Ford et al., 1983
<i>Juglans nigra</i>	RBC	17,7	min. 5
<i>Gmelina arborea</i>	Área plantada por año necesaria para justificar la inversión, asumiendo la ganancia genética de 5%	125 ha	Hamilton et al., 1998
<i>Picea mariana</i>	TIR	4,4 %	Cornelius y Morgenstern, 1986

## Requisitos para un programa de mejoramiento genético agroforestal

La mejora genética puede ser muy compleja, pero también existen opciones más simples. [Hamilton et al \(1998\)](#) estimaron el costo del establecimiento de un huerto semillero de plántulas de *Gmelina arborea* en Costa Rica:

Actividad	Año	Costo <sup>1</sup> (\$)	VNP <sup>2</sup>
Selección de árboles plus, \$22 por árbol	-1	523	556
Colección de semilla, \$22 por árbol	-1	466	496
Costos de vivero	-1	194	199
Costos de establecimiento, \$702 por ha	0-1	1404	1416
Matenimiento, \$433 por ha	0-4	2098	1976
Medición y análisis	3	936	808
Conversion a huerto semillero \$232/ha	3-4	394	332
Subtotal			5783
Costos admin. 5%,			867,45
<b>Total</b>			<b>6650</b>

1 Salarios: Ingeniero Forestal, \$16.000 p.a., técnico de campo, \$8.000 p.a, obreros, \$3.500 p.a.

Los requisitos esenciales para un programa de este tipo serían:

- Acceso a un vehículo de doble tracción;
- Servicios de un Ing. Forestal;
- Los fondos indicados en el cuadro;
- Acceso a un vivero;
- Herramientas y equipos de campo y vivero;
- Equipos de medición y formularios;
- Acceso a un consultor en análisis estadístico genético. Los costos y requisitos de otras opciones más simples (ej. un rodal semillero) podrían ser menores.

## 5.0 CÓMO SE HACE: LOS ENFOQUES

---

### TRADICIONALES Y PARTICIPATIVOS

---

- En el mejoramiento genético científico-tradicional, los experimentos se llevan a cabo en las estaciones experimentales, donde también se produce el germoplasma mejorado. Además, los investigadores toman las decisiones con poco involucramiento de los agricultores.
  - Este enfoque tiene algunas ventajas: es más fácil controlar el mantenimiento de los experimentos y los costos en generales pueden ser menores. Además, puede ser posible vender el germoplasma y así contribuir a la autosuficiencia de las actividades de investigación.
- El enfoque participativo representa una alternativa importante. En este sistema, los productores y los investigadores implementan las actividades en forma conjunta. Los experimentos se realizan en chacra, y frecuentemente son evaluados por los mismos agricultores. El germoplasma mejorado también se puede producir en chacra.
  - El enfoque participativo pretende asegurar que los productos del mejoramiento son acordes con las necesidades de los productores. Su involucramiento en el proceso facilita la adopción y uso del germoplasma superior, y ellos mismos pueden beneficiar de su comercialización. El IDRC de Canadá ha publicado [una introducción al mejoramiento participativo \(Vernooy, 2003\)](#), el cual se encuentra disponible gratuitamente en la red.
- Ambos enfoques pueden producir resultados y germoplasma de calidad. Sin embargo, todos los programas deben incluir un componente de consulta con los usuarios futuros del germoplasma.
- El Programa de Domesticación de Árboles Agroforestales (ICRAF-INIEA) es un ejemplo de un programa participativo.

## 6.0 DOMESTICACIÓN DE ÁRBOLES AGROFORESTALES EN LA AMAZONIA PERUANA

**Jonathan P. Cornelius<sup>1</sup>; Carmen Sotelo – Montes<sup>2</sup>; L. Julio Ugarte – Guerra<sup>1</sup>,  
John C. Weber<sup>3</sup> y Auberto Ricse – Tembladera<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> World Agroforestry Centre (ICRAF), Lima, Peru.

<sup>2</sup> Department des sciences du bois et de la foret, Faculte de foreterie et de geomatique, Universite Laval, Quebec, Canada

<sup>3</sup> World Agroforestry Centre (ICRAF), Bamako, Mali.

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Investigación y Extensión Agraria (INIEA), Pucallpa, Perú

### Introducción

Los agricultores de la Amazonia peruana utilizan más de 250 especies de árboles para diversos fines (Sotelo Moines and Weber 1997). Sin embargo, al igual que en muchos países tropicales, la deforestación y fragmentación del bosque está reduciendo la diversidad, calidad y disponibilidad de estos recursos. Los principales afectados en términos de ingresos, autosuficiencia y seguridad alimentaria son las comunidades locales. La domesticación agroforestal definido por el ICRAF como la identificación, producción, manejo y adopción de germoplasma de calidad (Simons and Leakey 2004) representa una respuesta posible a esta problemática, promoviendo la conservación a través del uso de especies prioritarias.

En 1995, ICRAF-INIEA iniciaron un programa de domesticación de árboles agroforestales en la Amazonia peruana, dirigido a alcanzar los siguientes objetivos específicos (a) salvaguardar los recursos genéticos de especies prioritarias; (b) el desarrollo de fuentes semilleras de alta calidad, para facilitar el acceso y uso de las especies seleccionadas; (c) generar ingresos por venta de germoplasma; (d) concientizar sobre la importancia de la variación genética intraespecífica y (e) catalizar la domesticación agroforestal en el Perú y generar un modelo apto para ser aplicado en otras zonas comparables. A continuación, se describen los elementos principales del programa y los resultados hasta la fecha.

### El punto de partida: la priorización

No es posible trabajar con todas las especies de interés a los agricultores. Por lo tanto, se empleo un proceso sistemático de priorización, basado en la

metodología de Franzel et al. (1996). Los agricultores identificaron más de 150 especies prioritarias (Sotelo Montes y Weber, 1997). Con base en estas preferencias, así como insumos de especialistas de mercadeo, desarrollo y otras disciplinas, se preparó una lista ordenada, de acuerdo con el potencial de las especies para ser utilizadas en proyectos de desarrollo agroforestal (Cuadro 1). Finalmente, se seleccionaron cuatro especies para su inclusión en el programa de domesticación: pijuayo (*Bactris gasipaes*), guaba (*Inga edulis*), capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y bolaina (*Guazuma crinita*). Se describen algunas características de estas especies en el Cuadro 2.

## Actividades de mejoramiento genético

Se han establecido 141 diferentes plantaciones de las cuatro especies, la mayoría de ellas componentes (bloques) de experimentos formales, función que combinan con las de conservación genética (*circa situm*) y producción de semilla. Los productores colaboran en las decisiones clave, efectúan y están en contacto frecuente con el personal de ICRAF (Cuadro 3), Para asegurar la consistencia en el manejo de las plantaciones, los productores reciben una compensación monetaria.

### Ensayos de procedencias

Se implementaron ensayos de procedencias en bolaina y capirona. Se empleó un diseño similar en los dos casos, con 10 (capirona) o 12 (bolaina) procedencias en bloques completos al azar (parcelas de 16 y 36 árboles respectivamente). Los bloques fueron plantados descontiguamente en terrenos de diferentes agricultores en la parte baja, mediana y alta de la cuenca del Río Aguaytía. Se discuten algunas ventajas de este diseño en la sección sobre ensayos de progenies

### Selección participativa de árboles madres

Los productores participaron directamente en la selección de los árboles madres, de las cuatro especies. Por ejemplo en el caso de pijuayo, se colectó semilla de polinización abierta de 402 árboles de la raza local sin espinas de Pampa Hermosa. Los árboles fueron escogidos principalmente con base en las características del fruto (cantidad, color del exocarpo, contenido de aceite y almidón, textura y tamaño). Además colaboración agricultores e investigadores en la selección de 209, 283 y 45 progenies de bolaina, capirona y guaba respectivamente.

### Ensayos de progenies y huertos semilleros

La columna vertebral del programa es una red de ensayos de progenies / huertos semilleros de bolaina, capirona y pijuayo. Se estableció un solo experimento en el caso de bolaina y dos experimentos complementarios en los casos de capirona y pijuayo. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con 1045 bloques

por experimentos distribuidos en las propiedades de diferentes agricultores. Cada bloque contiene de 50 a 200 familias en parcelas de dos árboles. El uso de parcelas de 2 árboles refleja los objetivos de conservación genética (un espaciado final factible puede ser alcanzado sin tener que eliminar familias enteras). El diseño innovador se escogió en parte por razones pragmáticas manejar un área mayor de 0,5 ha podría ser difícil para los productores rurales que albergan los ensayos. Pero también ofrece otras ventajas importantes (i) se muestrea un rango más amplio de condiciones que en el caso de un experimento concentrado en un solo sitio; (ii) permite la aplicación de diferentes criterios e intensidades de selección en bloques diferentes, posibilitando la conversión de los bloques en huertos semilleros con diferentes énfasis en conservación y ganancia genética y diferentes énfasis en características específicas.

### **Comprobación de conocimientos locales**

Se están examinando varias hipótesis derivados de conocimientos locales. Por ejemplo, algunos productores consideran que en capirona, la corteza rojizo-marrón y con pocos nudos indica madera de alta densidad. La confirmación de hipótesis de este tipo generaría la información de utilidad en el desarrollo de material mejorado.

### **Mejoramiento genético: resultados hasta la fecha**

Los resultados iniciales de los ensayos de campo confirman la utilidad del enfoque experimental. Weber y Sotelo (2005) reportaron sobre variación y correlaciones en crecimiento, densidad y valor calórico de procedencias de capirona entre 30 y 42 meses. Los resultados indicaron que la variación entre procedencias no era de gran magnitud, reivindicando la estrategia de mejoramiento del programa, en la cual las poblaciones de mejoramiento son derivadas exclusivamente de árboles de la cuenca del Aguaytía. Los resultados publicados sobre bolaina (Sotelo et al, 2000) también respaldan el uso de material local para conformar las poblaciones de mejoramiento.

### **Estudios de variación genética molecular**

Se han llevado a cabo tres estudios de variedad molecular, examinado variación en poblaciones de pijuayo, capirona y guaba. Russell *et al.* (1999) encontraron que la variación genética (estimada por AFLPs) es concentrada a nivel intrapoblacional. Sin embargo, los valores de  $F_{st}$  fueron de nivel intermedio (0,118) y había una variación significativa entre poblaciones. Los resultados sugirieron que sería imprudente concentrar los esfuerzos de conservación genética sólo en unas pocas poblaciones.

En el caso de pijuayo (Adin at., 2004), hubo poca diferenciación entre poblaciones ( $G_{st}$  de 0,03-0,04), lo cual puede ser explicado por flujo alélico entre poblaciones, probablemente mediante intercambios de semillas entre

agricultores, como observaron Weber *et al.* (1997). Finalmente, Hollingsworth *et al.* (2005) encontraron menos riqueza alélica de marcadores SSRs en rodales plantados de guaba en comparación con poblaciones naturales, indicando los posibles problemas de erosión genética que pueden presentarse cuando los aspectos genéticos no se toman en cuenta en el manejo de germoplasma agroforestal.

### **Fortalecimiento de las capacidades de los productores participantes**

En 1999, los productores colaboradores formaron una asociación civil (PROSEMA, asociación de Productores de Semilla y Madera de Calidad de la Cuenca del Aguaytía). Recientemente, PROSEMA, con el apoyo del ICRAF, ha formado una empresa (ECOCUSA) abastecedora de productos y servicios agroforestales. ICRAF ha implementado una serie de actividades para fortalecer las capacidades de los productores involucrados en varios campos relacionados a la producción agroforestal, incluyendo administración de pequeños negocios y la capacitación en técnicas productivas específicas. PROSEMA/ECOCUSA está generando ingresos cada vez mayor de la venta de semilla agroforestal. Próximamente, se espera registrar los huertos semilleros en el marco del recién promulgado Reglamento de Semillas Forestales. Se espera que con esta medida aumente en mayor medida la venta de germoplasma.

### **Conclusiones**

En gran medida, el programa está logrando sus objetivos. Ha demostrado un enfoque para la conservación de los recursos genéticos agroforestales. Se ha establecido fuentes de sernilla de alta calidad. Los agricultores están generando ingresos por venta de germoplasma. Si bien todavía hay poca conciencia sobre la importancia de la variación intraespecífica, es probable que la situación cambie conforme se hacen disponibles y se diseminan los resultados del programa. Urge ahora utilizar esa experiencia como modelo para aumentar la cantidad de especies cubiertas por programas formales de domesticación, para asegurar el acceso de los productores a la gama de especies que contribuyen a su sustento diario. El programa constituye un ejemplo sólido de lo que se puede lograr en colaboración con los productores pequeños. Sin embargo, para aumentar el número de especies cubierto, se debe pensar también en opiniones a menor escala, ej. Plantaciones semilleras ubicadas en propiedades pequeñas.

Finalmente, es importante enfatizar que la domesticación por si sola representa sólo parte de la solución de los problemas de degradación de recursos genéticos forestales. Para lograr resultados más amplios, el trabajo en domesticación debe ser asociado a una agenda más amplia. El fortalecimiento de alianzas de este tipo es uno de los objetivos de la Iniciativa Amazónica para el Uso Sostenible

de los Recursos Naturales, un consorcio internacional de organizaciones de investigación formalizada en 2004 (Porro *et al.*, 2005). A través de la Iniciativa Amazónica y sus redes temáticas, ICRAF e INIEA trabajarán para fortalecer las conexiones de trabajo en domesticación con aspectos más amplios relacionados al manejo sostenible de recursos naturales, ej. política de recursos naturales, educación y capacitación.

## Referencias

- Adin, A., J.C. Weber, C. Sotelo - Montes, H. Vidaurre, B. Vosman, M.J.M. Smulders 2004 Genetic differentiation and trade among populations of peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth) In the Peruvian Amazon - implications for genetic resource management. *Theoretical and Applied Genetics* (2004) 108: 1564-1534
- Clement C.R., J.C. Weber, J. van. Leeuwen, C.A. Domian, D.M. Cole, L Arévalo Lopez, H Arguello 2004. Why extensive research and development did not promote use of peach palm fruit in Latin America. *Agroforestry Systems* 61: 195-206.
- Cornelius, J.P., C.R. Clement, J.C. Weber, C. Sotelo-Montes, J. Van Leeuwen, L.J. Ugarte-Guerra, A. Ricse-Tembladera, L. Arévalo-López., 2005. The trade-off between genetic gain and conservation in a participatory improvement programme: the case of peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth). *Forests Trees and livelihoods* (in press).
- Franzel, S., H. Jaenike, W. Janssen. 1996. Choosing the right trees: setting priorities for multipurpose tree improvement (ISNAR Research Report No. 8). The Hague: International Service for National Agricultural Research, 87p.
- Hollingsworth, P.M., I.K. Dawson W.P. Goodall-Copestake, J.E. Richardson, J.C., Weber, C. Sotelo-Montes. 2005. Do' farmers reduce genetic diversity when they domesticate tropical trees? A case study from Amazonia. *Molecular Ecology* 14: 497-501.
- Leakey, R.R.B., A.C. Newton (Eds.). 1994. Domestication of tropical trees for timber and non-timber products. MAB Digest 17. UNESCO, Paris.
- Mora-Urpi, J., J.C. Weber, C.C. Clement. 1997. Peach palm. *Bactris gasipaes* Kunth. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops 20. International Institute for Plant Genetic Resources, Rome.
- Porro, R., A. Serrão, J.P. Cornelius 2005. The Amazon Initiative: a multidisciplinary, international consortium for prevention, mitigation and reduction of resource degradation 81(3), May-June 2005 (in press).



- Russell, J.R., J.C. Weber, I.A. Booth, W. Powell, C. Sotelo-Montes. 1999. Genetic variation of *Calycophyllum spruceanum* in the Peruvian Amazon basin, revealed by amplified fragment length polymorphism (AFLP) analysis. *Molecular Ecology* 8: 199-204.
- Simons, A.), R.R.B. Leakey. 2004. Tree domestication in tropical agroforestry. *Agroforestry systems* 61: 167-181.
- Sotelo-Montes, C., J.C. Weber. 1997. Priorización de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la selva baja del Perú. *Agroforestería en las Américas* 4(14): 12-17.
- Sotelo-Montes, C., H. Vidaurre, J.C. Weber, Aj. Simons, I.K. Dawson. 2000. Producción de semillas a partir de la domesticación participativa de árboles agroforestales en la amazonia peruana. In Salazar, S<sub>g</sub> (Coord. Memorias del Segundo Simposio sobre Avances en la Producción de Semillas Forestales en América Latina, Turrialba, Costa Rica: Centro de Agricultura Tropical y de Enseñanza.
- Walters, B.B., C. Sabogal, L.K. Snook, E. de Almeida. 2005. Constraints and opportunities for better silvicultural practice in tropical forestry n interdisciplinary approach. *Forest Ecology and Management* 209 (200 ): 3-18.
- Weber, J.C., C. Sotelo-Montes, H. Vidaurre, I.K. Dawson, A.J. Simons. 2001 Participatory domestication of agroforestry trees an example from the Peruvian Amazon. *Development in Practice* 11(4): 42-433.
- Weber, J.C., C. Sotelo-Montes. 2005. Variation and correlations amo stem-growth and wood traits of *Calycophyllum spruceanum* Benth. from the Peruvian Amazon. *Silvae Genetica* (in press).
- Weber J.C., RL Labarta Chavarri, C. Sotelo-Montes, A.W. Brodie, E. Cromwell, K.; Schreckenber, A.J. Simons. 1997. Farmers use and management of tree germplasm case studies front the Peruvian Amazon Basin. In Simons, A.J., R. Kindt, F. Place (Eds.), proceedings of an international workshop on policy aspects of tree germplasm supply a d demand International Centre for Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya, pp.57-63.

**Cuadro 1.** Especies prioritarias para la investigación agroforestal en la Amazonia Peruana

Rango	Nombre botánico (nombre común)	Familia	Productos o servicios principales
1	<i>Bactris gasipaes</i> (pijuayo)	Arecaceae	Alimento
2	<i>Cedrelinga catanaeformis</i> (tornillo)	Leguminosae	Madera
3	<i>Cedrela odorata</i> (cedro)	Meliaceae	Madera
4	<i>Inga edulis</i> (guaba)	Leguminosae	Sombra, leña, alimento
5	<i>Calycophyllum spruceanum</i> (capirona)	Rubiaceae	Madera
6	<i>Guazuma crinita</i> (bolaina)	Sterculiaceae	Madera
7	<i>Mauritia flexuosa</i> (aguaje)	Arecaceae	Alimento
8	<i>Phytelephas macrocarpa</i> (yarina)	Arecaceae	Techos, alimento, marfil vegetal
9	<i>Bertholettia excelsa</i> (castaia)	Lecythidaceae	Alimento
10	<i>Poraquilba sericea</i> (umari)	Icacinaceae	Alimento
11	<i>Pouteria caimito</i> (caimito)	Sapotaceae	Alimento
12	<i>Tabebuia serratifolia</i> (tahuari)	Bignoniaceae	Madera
13	<i>Spondias mombin</i> (ubos)	Anacardiaceae	Alimento
14	<i>Ficus anthelmintica</i> (oje)	Moraceae	Medicina
15	<i>Sheelea scheelea</i> (shebon)	Arecaceae	Techos
16	<i>Euterpe precatoria</i> (huasai)	Arecaceae	Alimento
17	<i>Pollalesta discolor</i> (yanavara)	Asteraceae	Leña, cerco vivo
18	<i>Croton matourensis</i> (ciprana)	Euphorbiaceae	Madera
19	<i>Caryodaphnopsis fosteri</i> , <i>Ocotea spp</i> (moena)	Lauraceae	Madera
20	<i>Lepidocaryum tessmannii</i>	Arecaceae	Techos

**Cuadro 2.** Características principales de las especies prioritarias

Especie	Ecológicas	Características principales Socioeconómicas
<i>Bolaina blanca</i> ( <i>Guazuma crinite</i> )	Especie pionera de rápido crecimiento, necesita pH neutro o ligeramente ácido, se encuentra naturalmente en suelos aluviales o suelos de fertilidad de media a alta.	En los mejores sitios puede producir madera comercial en turnos cortos (6 años) la madera de esta especie tiene gran demanda local, pero esta demanda está siendo cubierta principalmente por el bosque natural (Ugarte-Guerra, 2004).
<i>Capirona</i> ( <i>Calycophyllum spruceanum</i> )	Pionera de crecimiento lento, gran tolerancia a la inundación, predominantemente aluvial.	Rotaciones mayores de 15 años, produce madera de alta densidad, de alta demanda local y nacional (se usa en pisos y muebles rústicos).
<i>Guaba</i> ( <i>Inga edulis</i> )	Especie semidomesticada, muy en función de sitios, gran tasa de sobrevivencia en sitios degradados	Muy valorada por sus múltiples usos como: sombra para ganado o cultivos agroforestales, fijador de nitrógeno, leña, y en menor grado productor de vainas comestibles.
<i>Pijjuayo</i> ( <i>Bactris gasipaes</i> )	Domesticado, generalmente se encuentra en huertos familiares o en zonas de barbecho forestal.	Cultivo ancestral amazónico, siendo la única palmera domesticada de América tropical, por su contenido nutricional podemos compararla con una papa de árbol (Clement et al., 2004). Después de cocinar adquiere un sabor exquisito, puede ser procesado en una gran variedad de sub-productos, como: harinas para alimentación infantil, aceite para consumo humano directo o alimentación animal (Mora-Urpi et al., 1997). La palmera tiene otros usos, principalmente como insumo para la industria del palmito principalmente en Costa Rica, Ecuador, y Brasil (Sao Paulo).

**Cuadro 3.** Nivel de participación en las actividades y decisiones del programa de domesticación participativa ICRAF-IIIEA en la amazonia peruana.

Actividades / decisiones	Participación*	
	Productores	ICRAF / INIEA
<b>Pasado / Presente</b>		
Selección de especies objetivo	1	1
Criterios de selección para la elección de árboles madre	1	1
Colecta de árboles, colecta de semillas	1	1
Producción de plantones	1	1
Diseño experimental	0	1
Selección de sitios	1	1
Provisión de campos experimentales	1	0
Establecimiento de pruebas	1	1
Monitoreo diario / semanal	1	1
Monitoreo mensual	1	1
Mantenimiento de ensayos	1	1
Análisis estadístico e interpretación de resultados	0	1
<b>Futuro</b>		
Identificación de criterios de raleo y deshierbe	1	1
Raleo	1	1
Colecta de semillas en huertos semilleros	1	1

\* 1 = participación predominante; 0 = menor participación o ninguna participación.

## 7. PRIORIDADES EN EL PERÚ

---

- En el Perú, los productores pequeños por lo general tienen mucho interés en adquirir germoplasma de buena calidad de sus especies prioritarias, incluyendo especies frutales, maderables, medicinales, y otros.
- Sin embargo, en muchos casos no hay disponibilidad de semillas, y mucho menos de semillas de calidad.
  - Estas fuentes deben ser establecidas en escala local, porque los productores tienen pocas posibilidades de adquirir semillas producidas en departamentos lejanos.
  - Debe considerarse el establecimiento de fuentes semilleras en terrenos de los mismos productores, para facilitar su acceso al germoplasma, el cual también puede ser vendido a los programas de reforestación. También el germoplasma puede ser intercambiado o vendido a otros productores.
- Algunas acciones necesarias son:
  - Identificación y preservación de rodales semilleros y árboles semilleros para el abastecimiento de germoplasmas de una variedad amplia de especies.
  - Desarrollo de huertos semilleros de plántulas o plantaciones semilleras para abaratar y mejorar la calidad de semilla a mediano plazo.
  - Capacitación en técnicas de propagación vegetativa al nivel del extensionista y promotor, conjuntamente con el entrenamiento en manejo de diversidad genética agroforestal. La aplicación de la propagación vegetativa de diferentes tipos permitiría el desarrollo rápido de cultivares locales de decenas de especies agroforestales

## 8. EL MEJORAMIENTO GENÉTICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

### 1. Consideraciones generales del mejoramiento

Las selecciones actuales tienen como condición preestablecida que las condiciones edafo-climáticas para las cuales se hizo la selección, se mantendrán estables durante el tiempo de duración del turno forestal; sin embargo existe indicios que las condiciones climáticas no se mantendrán estables en un futuro próximo, especialmente en las zonas de amazonía, es por ello que debemos enfocarnos a la selección de familias que mantengan características deseables en una gran variedad de sitios. Una selección sin considerar los potenciales impactos del cambio climático supondría un riesgo para la productividad de las plantaciones forestales y agroforestales.

### 2. Conservación del germoplasma mejorado y de diversidad genética

Un punto clave en las estrategias para la adaptación al cambio climático consiste en coleccionar germoplasma de las especies de interés en condiciones climáticas altamente diversas, esta extensa colección de germoplasma tendría potencialmente un mayor poder de adaptación a condiciones cambiantes debido a la gran cantidad de genotipos colectados, adicionalmente se debe identificar dentro de las zonas de distribución natural las zonas más secas y más húmedas para determinar si estos orígenes o procedencias tendrían un mayor poder de adaptación a las nuevas condiciones, adicionalmente se debe aumentar la cantidad de especies dentro del mismo sitio forestal para disminuir el riesgo de pérdida de productividad a través de la diversificación (Dawson *et al* 2010).

Sin embargo de todas las medidas propuestas la conservación de grandes colecciones de germoplasma parecería la forma más eficiente de prevenir los efectos del cambio climático estableciendo un banco genético amplio con gran poder de adaptación a las nuevas condiciones.

### 3. Migración asistida

Con la identificación de una especie con gran poder de adaptación debido a: (1) su amplia distribución o (2) a la dispersión de sus poblaciones, es necesario incluir dentro de nuestra estrategia de recolección y distribución de germoplasma la migración asistida (managed recolonization en inglés), que consiste en desplazar las poblaciones actuales a nuevas áreas de colonización. Los efectos de la migración asistida son muy discutidos, sin embargo esta estrategia debe ser considerada para afrontar los rápidos cambios ambientales debidos al cambio climático.

## 9. BIBLIOGRAFÍA SELECTA Y

### REFERENCIAS CITADAS

- Andersson, E.W. 1999. Gain and diversity in multi-generation breeding programmes. *Silvestria* 95 (Acta Universitatis Agriculturae Sueciae).
- Anonimo, 1983. 27<sup>th</sup> Annual report, NCSU-Industry Cooperative Tree Improvement Programme. North Carolina State University
- Barnes, R.D.; Simons, A.J. 1994. Selection and breeding to conserve and utilize tropical tree germplasm. Pp. 84-102 en Leakey, r.R.B. y newton, A.C. (eds.), *Tropical trees: he potential for domestication and the rebuilding of forest resources*. London, HMSO, 284p.
- Bawa, K.S. y Hadley, M. (Eds.). 1990. Reproductive ecology of tropical forest plants. UNESCO Man and the Biosphere Series Vol. 7. Parthenon Publishing, 421pp.
- Berg, E.E. y Hamrick, J.L. 1997. Quantification of genetic diversity at allozyme loci. *Can. J. Forest Research* 27: 415-424.
- Boshier, D.H. 2000. Mating systems. Pp 63-79 en Young, A.; Boshier, D. y Boyle, T. (eds.). *Forest conservation genetics. Principles and practice*. Wallingford, Reino Unido y Collingwood, Australia, CSIRO/CABI, 352pp.
- Burley, J. y Wood, P.J. 1979. Manual sobre Investigaciones de Especies y Procedencias con Referencia Especial a Los Tropicos. Commonwealth Forestry Institute, Tropical Forestry Paper No. 10 cLD 10<sup>a</sup>, Department of Forestry, Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford, pp. 15-48.
- Charlesworth, D. 1988. A method for estimating outcrossing rate in natural populations of plants. *Heredity* 61: 469-471.
- Cordero, J. y Boshier, D.H. (Eds). 2003. *Árboles de Centroamerica: un manual para extensionistas*. Oxford ForestryInstitute / CATIE. 1079p.
- Corea, E.; Cornelius, J.P.; Mesen, J.F. 1992. Resultados del Proyecto Mejoramiento Genetico Forestal del CATIE, sus aplicaciones y efectos esperados. Actas, II Congreso Forestal Nacional, San Jose, Costa Rica
- Cornelius, J.P.; Mesen F., Corea E. (Eds). 1993. *Manual sobre Mejoramiento Genetico Forestal con Referencia Especial a America*

Central.Turrialba, Costa Rica, CATIE, Proyecto Mejoramiento Genético Forestal. 1 75 p.

Cornelius, J.P. 1994. Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. *Can. J. Forest Research* 24: 372-3 79.

Cornelius, J.P. 1994. The effectiveness of plus-tree selection for yield. *Forest Ecology and Management* 67: 22-34.

Cornelius, J.P. y Masis, J. 1995. Los riesgos del traslado de semilla forestal: el caso de *Alnis acuminata*. *Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales* No. 10, 13-15.

Cornelius, J.P., Corea, E.A., and J.F. Mesén. 1995. Additive genetic variation in height growth and leaf colour of *Eucalyptus deglupta* at ages up to 1 6 months in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 75 (1995) 49-59.

Cornelius, J.P., and E.K. Morgenstern. 1986. An economic analysis of black spruce breeding in New Brunswick. *Canadian Journal of Forest Research* 1 6 (3): 476-483.

Dawson, I.; Vincenti, B.; Weber, J.; Neufeldt, H.; Russel, J.; Lemgkeek, A.; Kalinganire, A.; Kindt, R.; Lileso, J.; Roshetko, J.; Jamnadass, R. 2010. Climate change and tree genetic resource Management: maintaining and enhancing the productivity and value of smallholder tropical agroforestry landscapes. A review. *Agroforestry System*. DOI 10.1007/s10457-010-9302-2

Eldridge, K.; Davidson, I.; Harwood, C.; van Wyck, G. 1994. *Eucalypt domestication and breeding*. Oxford, Clarendon Press, 288pp.

El-Kassaby, Y. 2000. Effect of forest tree domestication on gene pools. Pp.197.213 en Young, A.; Boshier, D. y Boyle, T. (eds.). *Forest conservation genetics. Principles and practice*. Wallingford, Reino Unido y Collingwood, Australia, CSIRO/CABI, 352pp.

Falconer, D.S. 1989. *Introduction to quantitative genetics*, 3~ edition. Longman, 438pp.

FAO. 2004. Preliminary review of biotechnology in forestry, including genetic modification in: *Forest genetic resources Working paper* 59.

Ford, D.; Merrill, R.E.; Mohn, C.A.; Stine, R.A. 1 983. Economimc analysis of the Minnesota Department of Natural Resources Tree Improvement program. 3~ North central States Tree Improv. Assoc. Meeting, 1 ,7th August, 1 983, Wooster, Chicago.



- Frankel, O.H. and Soulé, M.E. 1981. Conservation and ecology. Cambridge, England, Cambridge University Press, 327p.
- Gigord, L.; Lavigne, C.; Shykoff, J.A. 1998. Partial self-incompatibility and inbreeding depression in a native tree species of La Reunion (Indian Ocean). *Ecologia* 11 7: 342-352.
- Glaubitz, J.C.; Moran, G.F. 2000. Pp. 39-59 en Young, A.; Boshier, D. y Boyle, T. (eds.). Forest conservation genetics. Principles and practice. Wallingford, Reino Unido y Collingwood, Australia, CSIRO/CABI, 352pp.
- Hamann, A.; Koshy, M.P.; Namkoong, C.; Ying, C.C. 2000. Forest Ecology and Management 136(1-3): 107-119.
- Hamilton, P.C., Chandler, L., Brodie, A., Cornelius, J.P. 1998. A financial analysis of a small-scale *Gmelina arborea* Roxb. improvement programme in Costa Rica. *New Forests* 1 6: 89-99.
- Hamrick, J.L. y Nason, J.D. 2000. Pp. 81-90 en Young, A.; Boshier, D. y Boyle, T. (eds.). Forest conservation genetics. Principles and practice. Wallingford, Reino Unido y Collingwood, Australia, CSIRO/CABI, 352pp.
- Hartl, D.L.; Clark, A.G. 1989. Principles of population genetics. Sinauer, 682p.
- ICRAF, 2000. Paths to prosperity through agroforestry. ICRAF's corporate strategy 2001-2010. Nairobi: International Centre for Research in Agroforestry.
- Jones, T.H.; Steane, D.A.; Jones, R.C.; Pilbeam, D.; Vaillancourt, R.E.; Potts, B.M. 2006. Effects of domestication on genetic diversity in *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management* 234: 78-84.
- La Farge, T. 1993. Realized genetic gains in volume, volume per acre, and straightness in unrogued orchards of three southern pine species. En línea, <http://www.rngr.net/Publications/sftidl993/realized-genetic-gains-in-volume-volume-per-acre-and-straightness-in-unrogued-orchards-of-three-southern-pine-species/file>
- Lambeth, C.C. 2000. Realized genetic gains for first generation improved loblolly pine in 45 tests in coastal North Carolina. *Southern Journal of Applied Forestry* 24(3): 140-144.
- Ledig, F.T.; Porterfield, R.L. 1981. West coast tree improvement programs: a break-even, cost-benefit analysis. USDA For. Serv. Res. Pap. PSW-1 56.
- Lowe, A.J.; Boshier, D.; Ward, M.; Bacles, C.F.E.; Navarro, C. 2005.

Genetic resource impacts of habitat loss and degradation; reconciling empirical evidence and predicted theory for neotropical trees. *Heredity* 95: 255-273.

Marco, M. Sin fecha. Conceptos generales del mejoramiento genético forestal y su aplicación a los bosques cultivados de la Argentina. En línea, <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/forestacion/indiproymarco.pdf>.

Matheson, A.C. y Raymond, C.A. 1986. A review of provenance x environment interaction: its practical importance and use with particular reference to the tropics. *Commonw. For. Rev.* 65(4): 283-302.

Matheson, A.C.; Raymond, C.A. 1986. The impact of genotype x environment interactions on Australian *Pinus radiata* breeding programs. *Aust. For. Res.* 14: 11-25.

Matziris, D. 2000. Genetic variation and realized genetic gain from Aleppo pine tree improvement. *Silvae Genetica* 49(1): 5-10.

Matziris, D. 2005. Genetic variation and realized genetic gain from black pine tree improvement. *Silvae Genetica* 54(3): 96-104.

Meffe, G.K.; Carroll, C.R. 1994. Genetics: conservation of diversity within species. Pp. 143-178 en Meffe, G.K. y Carroll, C.R. (Eds.). *Principles of Conservation Biology*. Sinauer, 492pp.

Mesén, J.F. 1990. Resultados de ensayos de procedencias en Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico No. 156. CATIE, Costa Rica.

Mesén, J.F. 1994. Selección de especies y procedencias

Mesén, J.F. 1998. Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. Serie Técnica, Manual Técnico No. 30. CATIE, Costa Rica, 35p.

Morgan, J.A. 1970. An evaluation of investment in a Douglas-fir seed orchard program. Forestry Commission (G.B.) Internal mimeographed report, lpp.

Porterfield, R.L. 1975. Economic aspects of tree improvement programs. Pp. 99-117 in Thielges, B.A. (ed.), *Forest tree improvement — the third decade*, Proceedings, 24<sup>th</sup> Louisiana State University Annual Forestry Symposium, Baton Rouge, 243 pp.

Reilly, J.J.; Nikles, D.G. 1977. Analyzing costs and benefits of tree improvement: *Pinus caribaea*. Pp. 1099-1124 en *Proceedings, 3<sup>rd</sup> world consultation on forest tree breeding*, 21-26 March, 1977, Canberra, Australia.

- Ritland, K. 1990. A series of FORTRAN computer programs for estimating plant mating systems. *Journal of Heredity* 81: 235-237.
- Sotelo Montes, C.; Weber, J.C. 1997. Priorización de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la Selva Baja del Perú. *Agroforestería en las Americas* 4(14): 12-17.
- Stacy, E.A. 2001. Cross-fertility in two tropical tree species: evidence of inbreeding depression within populations and genetic divergence among populations. *Am. J. Bot.* 88(6): 1041-1051.
- Swofford, T.F.; Smith, O.D. 1972. An economic evaluation of tree improvement on the southern national forests. *USDA For. Serv. Sout. Reg. Publ. No. 10.*
- Ugarte-Guerra, J. 2004. Ensayo de progenie procedencias de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) en la Cuenca del río Aguaytía Ucayali Perú. Congreso Nacional de Botánica, Lima, Perú, 2004.
- Vergara, R.; White, T.L.; Huber, D.A.; Shiver, B.D.; Rockwood, D.L. Estimated realized gains for first-generation slash pine (*Pinus elliottii* var. *elliottii*,) tree improvement in the southeastern United States. *Can. J. For. Res.* 34: 2587-2600.
- Vernooy, R. 2003. Semillas generosas. Mejoramiento participativo de plantas. Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo (CIIRC). En línea, [http://www.idrc.ca/eslev-30294-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/eslev-30294-201-1-DO_TOPIC.html)
- Weber, J.C.; Labarta Chávarri, R.L.; Sotelo-Montes, C.; Brodie, A.W.; Cromwell, E. Schreckenber, K.; Simons, A.J. 1997. Farmers' use and management of tree germplasm: case studies from the Peruvian Amazon. Pp57-63 in Simons, A.J.; Kindt, R.; Place, F. (eds) proceedings of an international workshop on policy aspects of tree germplasm demand and supply, ICRAF, Nairobi, Kenya, 6-8 October 1997.
- White, T. 1992. Advanced-generation breeding populations size and structure. Pp. 208-222 en IUFRO, Conference Proceedings, S2.02-08, Breeding tropical trees, 9-18 October, Cali, Colombia. 468p.
- Williams, C.G.; Savolainen, O. 1996. Inbreeding depression in conifers: implications for breeding strategy. *Forest Science* 42(1): 102-117.
- Williams, E.R.; Matheson, C.E.; Harwood, C.E. 2002. Experimental design and analysis for tree improvement. 2<sup>nd</sup> edition. CSIRO, Australia, 214p.
- Wu, H.X. 1998. Inbreeding in *Pinus radiata*. I. The effect of inbreeding on growth, survival and variance. *Theor Appl Genet* 97: 1256-1268.

Young, A.; Boshier, D. y Boyle, T. (eds.). 2000. Forest conservation genetics. Principles and practice. Wallingford, Reino Unido y Collingwood, Australia, CSIRO/CABI, 352pp.

Zobel, B.; Talbert, J. 1984. Applied forest tree improvement. John Wiley and Sons, New York, USA, 505 p.

Zobel, B.J. 1992. Clonal forestry in the Eucalypts. Pp. 139-148 en Ahuja, M.R. y Libby, W.J. (eds.) Clonal Forestry II. Berlin, Springer, 240p

Zobel, B.; Talbert, J. 1984. Applied forest tree improvement. John Wiley and Sons, New York, USA, 505 p.

**D**esde el origen del género humano su relación con los bosques naturales ha sido siempre muy estrecha. Durante la época previa al descubrimiento de la agricultura, la dependencia de las poblaciones humanas hacia el bosque era completa, pues este proveía de los elementos esenciales para asegurar la supervivencia tales como: alimentos, energía, materiales para la construcción de viviendas y defensa. El descubrimiento de la agricultura no disminuyó la dependencia del bosque, sin embargo, en extensas áreas originalmente boscosas se inicia un proceso de producción agrícola, dando lugar al retroceso del bosque, lo que implica un mayor esfuerzo para conseguir laña, madera de construcción y otros productos forestales.

La domesticación de especies arbóreas comienza casi al mismo tiempo que la domesticación de especies agrícolas, principalmente en aquellas especies forestales usadas en la alimentación como los frutales y las nueces; una de las formas tradicionales de domesticación son los huertos familiares amazónicos, donde la población selecciona especies e individuos de áreas silvestres y los traslada a un ambiente mejor controlado cerca de su vivienda, esta es la forma tradicional de domesticación de las principales especies nativas amazónicas tales como el cacao o el caucho, proceso que continúa hasta el día de hoy.

La domesticación de árboles agroforestales comprende las actividades humanas para promover un cambio acelerado e inducido en las características de especies seleccionadas para un cultivo más intensivo y una distribución más amplia. En contraposición a la domesticación basada en características intrínsecas de la especie existe otro marco conceptual dirigido a la domesticación de los ecosistemas que es desarrollada por el manejo forestal. Las actividades de mejoramiento genético forestal serían una parte importante de las actividades necesarias para contribuir a la domesticación de las especies arbóreas.

Este manual es una contribución a este proceso interdisciplinario, esperando que sea útil para aquellos estudiantes e investigadores que necesitan una aproximación rápida y completa aunque no exhaustiva sobre este tema, con el objetivo de difundir los beneficios de la domesticación de especies arbóreas y su aplicación en los sistemas agroforestales.



World Agroforestry Centre  
TRANSFORMING LIVES AND LANDSCAPES

---

**World Agroforestry Centre—Perú**

**CIP - ICRAF**

**Apartado 1558, Lima 12, Perú**

**[www.worldagroforestry.org](http://www.worldagroforestry.org)**