

Capítulo 9 Investigación Forestal

La investigación probablemente siempre será un requisito importante de la forestería tropical. No es sólo la complejidad de los bosques y sus ambientes lo que nos atañe, sino que además sus reacciones a las interacciones no son ni fáciles de ver ni inmediatas. El manejador del bosque no debe pensar que sólo los científicos se dedican a la investigación. La solución a muchos problemas de manejo forestal ha surgido a raíz de observaciones e interpretaciones ingeniosas de empleados que no se consideran “científicos”. Además de esto, sin embargo, quien maneja el bosque debe reconocer que cuanto mayor sea el impacto de las operaciones forestales, tanto más profundos deberían ser los estudios simultáneos de las consecuencias, como guía para las mejoras futuras.

Las investigaciones se pueden definir como un examen sistemático de los fenómenos con el propósito de determinar los hechos. Algunos conocimientos críticos para la ciencia forestal tropical son difíciles de alcanzar debido a la naturaleza compleja e invisible de muchas de las fuerzas involucradas. Además, en muchas zonas tropicales la investigación forestal recién ha comenzado porque hasta ahora es evidente la necesidad de hacer algo más que simplemente recoger los frutos que ofrecen los bosques ya existentes.

Historia de la investigación forestal tropical

En el sentido más amplio, la investigación forestal en los trópicos comenzó con la misma práctica forestal, ya que las pruebas con cualquier nueva práctica constituyen una investigación rudimentaria. Algunos de los trabajos iniciales eran esencialmente botánicos y descriptivos; así, se reconocieron extensas clases de bosques, e identificaron y clasificaron las especies de árboles según sus usos tradicionales. Las etapas iniciales de esa recolección de conocimientos fue compilada por Schimper (1903), en su monumental trabajo descriptivo sobre la geografía de las plantas, el cual se cita reiteradamente en el Capítulo 2.

Desde principios del siglo XX se registraron estudios sobre maderas tropicales en la Península de Malasia (Ridley 1901), a los que siguieron otros informes más detallados (Foxworthy 1909, 1921). Las maderas de la India se describieron extensamente por primera vez en 1902 (Gamble 1902).

Las investigaciones oficiales e institucionales no se desarrollaron sino hasta mucho más tarde. El Instituto de Investigación Forestal en Dehra Dun, India, se estableció

en 1906 (Hart 1922). Cuatro años más tarde, se dio comienzo a un programa de medición de parcelas de muestreo, que en 1956 comprendía 1762 parcelas con observaciones de más de 100 especies arbóreas (Mathauda 1956). En 1931, se publicó un “Manual Experimental” para la India (Nair 1952); además, en 1960 ya se habían iniciado extensos programas de investigación en varios estados de la India. En Mysore, las líneas de investigación incluían prácticas de vivero, plantación, taungya, comparación de semillas de teca (*Tectona grandis*) según origen, aplicación de abonos y control de termitas (Krishnaswamy 1960). En Madhya Pradesh, la investigación buscaba la rehabilitación de bosques que anteriormente eran de propiedad privada, regeneración natural de la teca, raleo y tasas de crecimiento de los árboles dentro del bosque (Mujumdar 1960b).

En lo que hoy es Malasia, la investigación forestal formal comenzó en 1918, 17 años después de haber sido nombrado el primer oficial forestal (Menon 1976). El Instituto de Investigación Forestal de Malasia en Kepong ha existido desde 1929; fuente de gran parte de la silvicultura de bosques dipterocarpáceos, esta institución es una de las más grandes de su tipo en el mundo (Anón. 1988a). En 1987, el Instituto tenía un personal profesional y subprofesional de más de 100 personas, el mejor arboreto de especies dipterocarpáceas en el mundo y un herbario con más de 100 000 muestras. Las filiales de este Instituto se dedican a la silvicultura del bosque natural, plantaciones, biología, protección forestal y productos forestales.

En Filipinas, un estudio del manejo de *Leucaena leucocephala* publicado en 1914, el cual es todavía notablemente válido (Matthews 1914), evidencia la investigación de vieja data. En Nigeria, se ensayó con plantaciones por primera vez en 1907, y en 1943 se creó la Sección de Investigación del Departamento Forestal (Rosevear y Lancaster 1952). En lo que hoy es Sri Lanka, los registros fenológicos en los diarios de los oficiales forestales marcan el comienzo de las investigaciones en 1937 (Holmes 1956). Estos registros se sistematizaron más tarde para abarcar 2000 árboles de 125 especies en 40 parcelas visitadas mensualmente durante cinco años.

En el hemisferio occidental, las investigaciones forestales sistemáticas parecen haber comenzado en el sur de Brasil con la introducción de *Eucalyptus* alrededor de 1906 (Navarro de Andrade 1941a). El interés por los



Fig. 9-1.—La sede del Instituto Internacional de Dasonomía Tropical (IITF), con sede en Puerto Rico, una de las instituciones de investigación más venerables. El IITF forma parte del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los EE.UU.

bosques nativos del Brasil se formalizó mediante el estudio de nueve especies comenzado en 1953 (Gurgel Filho 1975). Un programa oficial de investigación forestal comenzó en el Amazonas en 1960 (Pitt 1961a), el cual incluía estudios sobre regeneración natural, crecimiento de rebrotes después del aprovechamiento, enriquecimiento y plantaciones cerradas.

La investigación ha acompañado al desarrollo forestal en todos los países de América tropical, aunque la intensidad de los empeños de investigación varían enormemente. Ahora existen instituciones de investigación en Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, México, Perú, Puerto Rico y Venezuela (Fig. 9-1). Las investigaciones en las regiones tropicales de México, más recientes que las investigaciones en zona templada, desde hace algún tiempo incluyen extensos estudios de los bosques naturales, plantaciones y agroforestería (Cedeño Sánchez 1976, Chavelas Pólito (1976).

La Oficina Regional para Latinoamérica de la FAO, trabajando con el Instituto Forestal Latinoamericano de Investigación y Capacitación en Mérida, Venezuela, reconoció en 1956 la necesidad de una colaboración internacional entre las instituciones de investigación forestal, y así, en 1958 se creó el Comité Regional de Investigación Forestal. Un producto del trabajo de ese comité fue el análisis de 16 instituciones de

investigación, el cual demostró un alto grado de semejanza entre los objetivos de sus programas de investigación y problemas administrativos (Wadsworth 1969).

De hecho, la colaboración internacional para la investigación forestal en los trópicos comenzó entre los países de un mismo poder colonial. Más recientemente, el Instituto Forestal del Commonwealth Británico (hoy el Instituto Forestal de Oxford) ha promovido una colaboración más amplia mediante la colección y distribución de semillas de diferentes procedencias de especies populares para plantaciones. Hasta 1990, el Instituto había recogido y distribuido a 122 países más de 22 000 lotes de semillas de 108 especies de árboles, incluso a la mayoría de los países neotropicales (Barnes y Burley 1990).

La América Tropical debe hacer sus propias investigaciones. La solución a los problemas de la región se encuentra en la región misma, y debe ser integrada a los cambios promovidos por el desarrollo.

Necesidades de investigación en la región

Antes de enumerar las necesidades de investigación, se debe enfatizar una condición fundamental en la mayoría de los trópicos. La llamada 'investigación moderna' es casi totalmente un producto de las sociedades ricas (Mlinsek 1982). Estos países tienen una tendencia hacia métodos caros que sustituyen con instrumentos muy desarrollados, las técnicas rudimentarias de aproximación. Si bien tales métodos aumentan la precisión y el carácter concluyente de los resultados, en las condiciones comunes de los trópicos, donde las aproximaciones pueden inicialmente ser adecuadas a falta de trabajos previos, el costo de tales métodos podría ser excesivo, si no prohibitivo. La selección de la tecnología apropiada para los trópicos, por lo tanto es tan importante para la investigación como para la práctica forestal.

En el neotrópico se necesita más información sobre un sinnúmero de asuntos forestales. La primera tarea (todavía incompleta) es identificar los problemas más urgentes; con tal fin se han registrado varios empeños; los que se resumen aquí presentan las conclusiones de muchos expertos. Se han reconocido tres amplias etapas en la investigación del manejo maderero (Dawkins 1949):

1. Etapa de composición — Cómo reconocer, medir y usar los componentes del bosque.
2. Etapa ecológica — Cómo interactúan con el sitio los árboles deseables.
3. Etapa silvicultural — Efectos de las prácticas de manejo en la conducta y productividad del bosque.

En el prefacio de una obra por la FAO sobre necesidades de investigación (King 1979b), aparece el comentario de que los países en desarrollo están concientes del significativo papel que los bosques, la forestería y la industria forestal pueden jugar en el desarrollo económico. Saben que los bosques pueden ayudar a ahorrar y ganar divisas extranjeras, estimular otras actividades económicas a partir de la materia prima o de la fabricación de productos, y crear oportunidades de empleo significativas, particularmente en las zonas rurales. A continuación se presentan los factores que merecen una atención especial:

- Especies de árboles en los bosques tropicales húmedos.
- Volúmenes de madera en pie por especie.
- Distribución de especies y tasas de crecimiento.
- Reacciones del bosque a los sistemas silviculturales y de manejo.
- Técnicas para la regeneración de especies comerciales.
- Técnicas económicamente factibles para la mezcla de pulpas.
- Efectos a largo plazo del cultivo intensivo de árboles en plantaciones sobre la productividad del suelo.
- Fuentes de semillas superiores.
- Genotipos adaptados a sitios difíciles.
- Técnicas de propagación vegetativa para el mejoramiento de árboles.

En términos generales, las necesidades de investigación en la región del Amazonas son (Fearnside 1979b, Prance 1982):

- La biota (al menos el 20% de las especies de plantas todavía no han sido identificadas, al igual que la mitad de los insectos)
- La capacidad de carga de los sitios, en términos de la cantidad de gente que pueden mantener y la cantidad de madera que pueden producir con rendimientos sostenidos
- La extensión, causas, efectos y métodos de controlar la deforestación
- El uso racional y planificado de los bosques
- El papel que juegan las micorrizas
- Sistemas de producción de germoplasma

El Centro Internacional de Investigación Forestal (CIFOR), bajo los auspicios del Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional (CGIAR) ha redactado un programa de mediano plazo (1993-98) con los siguientes componentes:

Desarrollo de políticas

- Políticas e incentivos para lograr la sostenibilidad de los bosques
- Sistemas de distribución equitativa de los beneficios y costos de los bienes y servicios del bosque
- Adopción de cambios de políticas
- Políticas para aumentar el empleo y los ingresos con los bosques
- Ubicación y tipos de recursos forestales capaces de satisfacer las demandas futuras por bienes y servicios

Manejo y conservación de bosques naturales

- Aprovechamiento y manejo de bajo impacto
- Manejo de la biodiversidad y de diversos productos
- Sistemas de predicción del crecimiento y rendimiento
- Manejo sostenible de bosques secos
- Biología y genética reproductiva

Reforestación de terrenos agotados

- Técnicas no industriales
- Correspondencia entre especies forestales y genotipos con las condiciones biofísicas del sitio y sistemas de manejo
- Técnicas para caracterizar las variaciones genéticas y relacionarlas con adaptaciones fisiológicas y morfológicas

Fisiología y bioquímica de las plantas para el mejoramiento de la propagación vegetativa
Plantaciones mixtas para productos múltiples
Rendimientos de las plantaciones en segunda y subsiguientes rotaciones

Productos y mercados

Manejo de los recursos para productos no maderables por parte de las comunidades locales y grupos de usuarios

Requerimientos del mercado y posibilidades para productos forestales no maderables de poco uso

Expansión y armonización de bases de datos sobre propiedades y usos de maderas tropicales y productos forestales no maderables

Efectos sociales y económicos de las nuevas tecnologías para agregar valor a los productos en o cerca de los bosques

Apoyo e información para la investigación

Desarrollo de los recursos humanos

Servicios de publicación e información

Armonización, integración y disseminación de bases de datos

El bambú (Gramineae) es uno de los grupos de plantas tropicales de mayor uso actual y futuro. Por consiguiente, una amplia gama de prioridades de investigación básica (muchas de las cuales se aplican igualmente a otras especies forestales) se ha recomendado para este grupo vegetal (Lessard y Chouinard 1980), incluyendo: taxonomía, identificación en el campo, propagación, estructura anatómica, resistencia mecánica y preservación.

No es suficiente, sin embargo, con enlistar temas de estudio cuando los medios para emprender las investigaciones son inadecuados en todas partes. A partir de una revisión de 16 instituciones de investigación forestal en la región (Wadsworth 1969), se llegó a las siguientes conclusiones:

- La deficiencia más crítica era la capacitación de los científicos.
- Había un alto riesgo de duplicar esfuerzos debido a que los problemas técnicos eran comunes en gran parte de la región.
- Los esfuerzos de coordinación debían comenzar con el análisis de los problemas regionales y el establecimiento de prioridades.

- Las reuniones de los líderes y científicos de las instituciones eran poco frecuentes o inexistentes; sin embargo, son necesarias para lograr una investigación regional efectiva.
- En general, los aspectos técnicos como suelos, hidrología, manejo de la fauna silvestre, agroforestería, utilización de desechos, control de incendios, y procesamiento, clasificación y mercadeo de productos, recibían poca o ninguna atención.

En 1970, el Comité de Investigación Forestal de la Comisión Forestal para Latinoamérica de la FAO emitió una lista de recomendaciones para los gobiernos nacionales y agencias de asistencia técnica internacional, con el fin de fortalecer las investigaciones forestales de la región (Anón. 1970). La mayoría de las observaciones registradas en esa lista todavía son válidas:

- La investigación forestal no debe ser considerada meramente como un apéndice de las agencias forestales, o como un ejercicio para estudiantes graduados, sino más bien como la punta de lanza para el desarrollo forestal futuro.
- Las responsabilidades de investigación forestal se deben delinear claramente y las organizaciones gubernamentales deben apoyarlas continuamente, primero como una actividad primordial de la autoridad forestal nacional, y segundo, como una actividad complementaria de las facultades forestales.
- Los científicos forestales necesitan sueldos adecuados, similares a los de otros campos de investigación, para fomentar la dedicación al desarrollo de una carrera en ese campo.
- El personal científico de instituciones de investigación debe coordinar esfuerzos en materia de forestería, agricultura y tecnología de la madera, fomentando una mentalidad de equipo y la comunicación frecuente y directa entre instituciones.
- Los científicos forestales deben tener oportunidades de capacitación continua sobre temas especiales, como diseños y técnicas experimentales, manejo de la investigación y redacción de informes técnicos.
- Un servicio de documentación centralizado es de importancia vital para los científicos forestales de la región.

- Para asegurar la comparabilidad, se necesitan técnicas estándares para la colección, análisis e interpretación de estadísticas forestales y datos de campo de medición de árboles y rodales.
- Una falta casi total de datos económicos sobre el aprovechamiento en la región requiere que se efectúen estudios sobre el valor de la madera en pie y costos de extracción y transporte de la madera a los centros de procesamiento, fabricación y consumo.
- Existe una necesidad creciente de información básica sobre el papel de los bosques en la conservación del suelo y agua y control de inundaciones. Son necesarias investigaciones relevantes y una red regional de cuencas demostrativas.
- Se debe preparar una lista actualizada, a nivel regional, de los centros de investigación forestal tropical capaces de suministrar o intercambiar semillas de árboles forestales de buena calidad.
- Se deben reservar áreas de ecosistemas forestales no modificados donde se puedan efectuar investigaciones ecológicas básicas, útiles para el manejo forestal.
- Utilización e investigación de productos forestales: ensayos con la madera, ingeniería de productos forestales, causas de la deforestación, asentamientos agrícolas, política de tenencia de la tierra, vínculos económicos, incentivos para la reforestación y aspectos de equidad y género.

La investigación de los bosques tropicales debe ser protegida de la interferencia externa. Los bosques representativos (tanto primarios como secundarios) se deben conservar hasta que se puedan efectuar los estudios previstos (o no previstos). Tal preservación es vulnerable a las presiones ejercidas a favor de otros usos de la tierra, y quizás pueda eventualmente fallar a menos que se emprenda un programa activo de investigación forestal, cuyos resultados sean publicados y utilizados.

Componentes de la investigación

La investigación debe ser abordada con la mente abierta; uno no puede ni aceptar los conocimientos tradicionales en forma complaciente, ni descartarlos apresuradamente. El científico debe efectuar preguntas constantemente, a sabiendas de que sus preguntas no siempre tendrán respuestas simples. Los nuevos estudios no siempre eliminan las incertidumbres, pero quizás proporcionen una mejor base a partir de la cual se pueda formular un juicio más claro.

Orientación. La investigación tiene que ver con la naturaleza, dirección y control de los cambios que llevan a un mejor futuro con resultados que representan esfuerzos a largo plazo. Por esas razones, es esencial que los científicos dirijan sus metas más allá de las actividades actuales. Para los programas de investigación nacional, esta perspectiva de largo plazo requiere que se analicen los problemas forestales y se establezcan las prioridades, para que la selección de los estudios a efectuar refleje las necesidades más críticas, actuales y futuras.

Un enfoque comprobado en la orientación de las investigaciones es el análisis del problema, un plan detallado para la solución de problemas en uso en EE.UU. (Anón. 1940-90). Estas publicaciones incluyen literatura pertinente y opiniones de científicos expertos. Los puntos más significativos del enfoque son los siguientes:

- Definición precisa del problema
- Consideraciones ambientales

La preocupación a nivel mundial por los bosques tropicales ha puesto de manifiesto las necesidades de investigación. A partir de un informe sobre las necesidades de investigación forestal en los países en desarrollo (Anón. 1981a), la segunda reunión de "Bellagio" en 1988, con la ayuda de un grupo de trabajo, redactó una propuesta para la implementación de los siguientes temas de investigación (Anón. 1990a):

- El papel de los bosques, terrenos arbolados y árboles en fincas y su contribución a la productividad agrícola, al uso idóneo de la tierra (fertilidad del suelo, microbiología, organismos micorrízicos, árboles fijadores de nitrógeno, plagas y enfermedades) y a los sistemas de manejo de árboles (intercalados con cultivos agrícolas y monocultivo).
- Conservación, selección, reproducción y mejoramiento de especies de propósito múltiple, particularmente especies fijadoras de N para agroforestería, reclamo de terrenos baldíos, leña, forraje, cultivos de árboles para la venta y plantaciones industriales.

- Componentes del problema
- Posibles beneficios de la solución de cada componente
- Enfoque propuesto
- Estudios y prioridades
- Plan para la difusión e implementación de los resultados
- Personal, instalaciones y cooperación necesaria
- Cronograma para iniciar el estudio
- Tiempo previsto para completar cada componente
- Costo estimado de cada componente

La formulación de preguntas claras que se deben responder es primordial para la planificación de la investigación. El proceso de derivar prioridades de investigación forestal orientada hacia la producción de mercaderías se ilustra en la Fig. 9-2.

Mucho se ha escrito sobre cómo se debe conducir un experimento. Sin embargo, la mayoría de los experimentos no logran todo lo que se espera de ellos, porque son imperfectos en su concepción, ejecución o interpretación. Algunos puntos que se deben tomar en cuenta en las investigaciones aparecen a continuación. Todo estudio serio debe comenzar con la preparación de un plan escrito, presentado con suficiente detalle, para que sea posible continuar la investigación, si esta debe ser emprendida por distintos científicos antes de acabar. Tal plan puede incluir los siguientes elementos:

Título

El título debe ser breve pero específico, que se diferencie de los demás estudios. Generalmente al plan se le da un número.

Literatura

Se debe describir el estado del conocimiento sobre el tema, técnicas, estudios relacionados en curso y fuentes de literatura asociadas. Aún si no hay literatura fácilmente disponible, es importante completar este paso lo más a fondo posible para evitar que se dupliquen u olviden metodologías recientemente desarrolladas.

Objetivos

La hipótesis y la pregunta específica que necesita respuesta se deben establecer con toda claridad, explicar su importancia y urgencia y describir las posibles aplicaciones y beneficios de los resultados.

Desde el principio, se debe establecer la importancia de toda la línea de investigación. Este es un paso crítico que a menudo se descuida; el enfoque de la investigación debe llevar a conclusiones o decisiones importantes y debe ser superior a los demás enfoques.

Muchas investigaciones se emprenden para elucidar preguntas de índole general, como “Cuál es el mejor árbol para el sitio X?” Debido a la interacción de múltiples factores, rara vez se puede obtener una respuesta definitiva a una pregunta tal con un sólo experimento. Un asunto general se debe reducir a preguntas más específicas, como “¿Cuál de las cuatro especies prometedoras crece más rápido en tres años, sin prácticas de manejo, en el sitio Q?” Es posible resolver esta cuestión con una sola prueba. Luego, los resultados de esta y otras pruebas para determinar la facilidad de establecimiento, efectos del sitio, calidad de la madera, aceptabilidad por la sociedad, entre otras, se pueden sintetizar en una hipótesis sobre la selección de especies cuyo ensayo se puede completar más adelante. Por ejemplo, con base en una serie de pruebas, la especie Y parece ser superior a la W, X y Z en el sitio Q.

La prudencia en la selección de la pregunta por resolver es de importancia primordial. La pregunta se debe postular de tal modo que la respuesta sea claramente afirmativa o negativa; si la respuesta conduce a la pregunta “cuánto?”, la cantidad debe decidirse en términos precisos, para distinguir las diferencias importantes de las insignificantes.

Métodos

Se debe describir el diseño del experimento (tamaño, réplicas, disposición de la parcela, derivación y datos requeridos) y los correspondientes análisis. Según sea apropiado, se debe establecer la ubicación, especificar el cronograma y el equipo necesario.

Uso de los resultados

Se deben describir los métodos de presentación ante el público, proceso de revisión, publicaciones y otras formas de uso de los resultados.

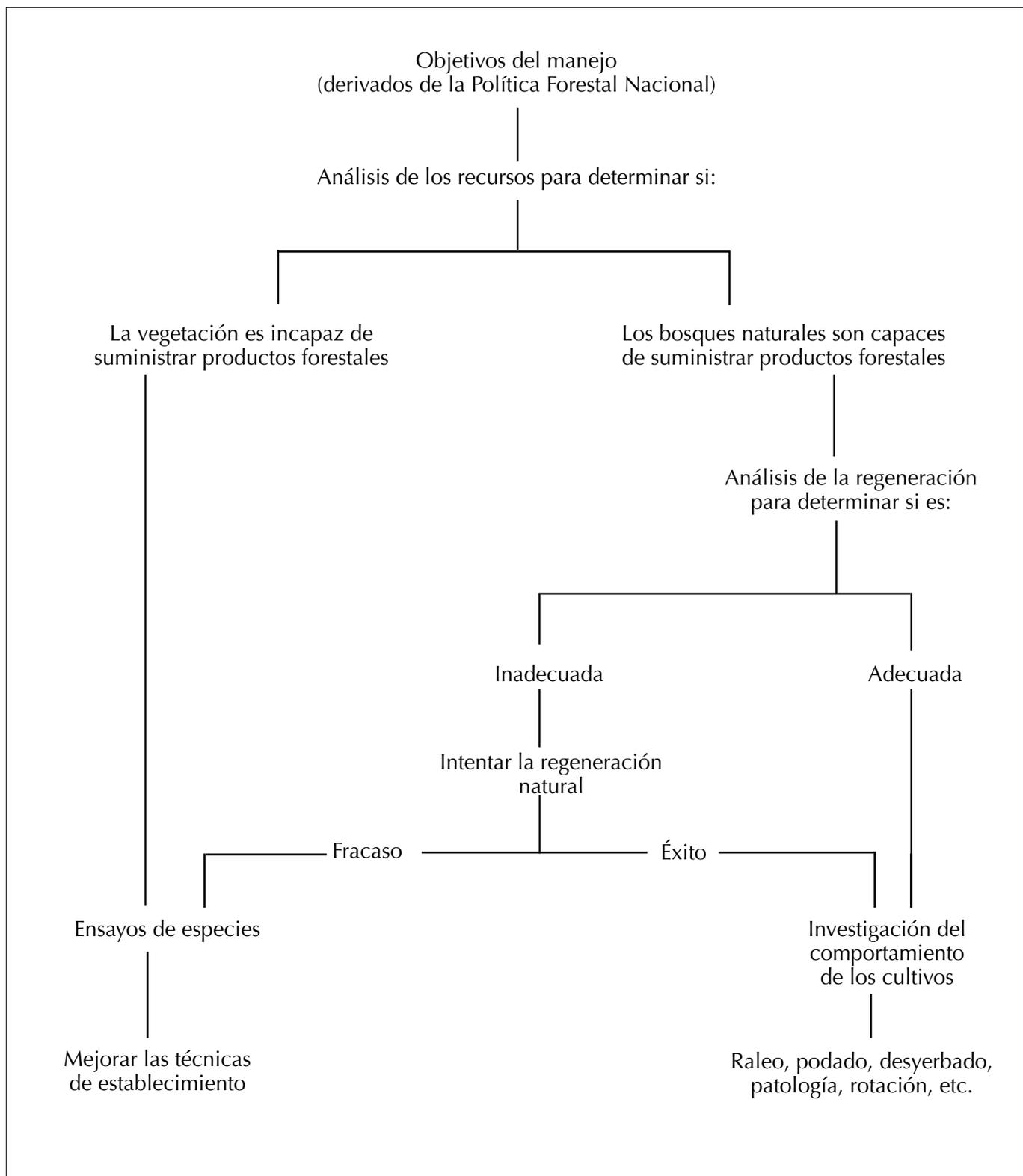


Fig. 9-2.—Derivación de las prioridades de investigación orientadas hacia la producción forestal (Philip 1964)

Diseño y análisis

El objetivo del estudio se debe presentar en términos estadísticos y se debe describir un diseño aceptable (tamaño, sitios, réplicas, disposición de la parcela o del muestreo, datos requeridos, y programación). Se debe describir el uso analítico propuesto para los datos, Según sea necesario, se debe indicar la ubicación, materiales y equipos.

Requisitos

Se deben considerar los recursos humanos, la programación, el transporte, necesidades de planta física y recursos financieros.

Apéndices

Se debe incluir como apéndices los mapas de ubicación, la disposición de las parcelas y las instrucciones para registrar datos. Se debe preparar un resumen y colocarlo al comienzo del plan, para atraer la atención del lector y dar una idea del tema y objetivos, alcance, diseño y análisis del proyecto.

Representatividad. Los experimentos son valiosos sólo si sirven para efectuar pronósticos. Lo que se observa a pequeña escala también debe ser de aplicación en una zona más extensa; si no, el estudio es poco útil. Parece obvio, por lo tanto, que los experimentos se deban efectuar bajo condiciones representativas de una gran zona de interés; sin embargo, este requisito básico comúnmente es pasado por alto, y muchos experimentos no son verdaderamente representativos. Los resultados, entonces, se aplican a condiciones que de hecho son muy distintas a las de la zona del estudio. Esta discrepancia a menudo ocurre debido a la predisposición de ubicar los experimentos en sitios accesibles o convenientes, una práctica permisible sólo en el caso de pruebas de carácter explorativo para obtener información cruda, necesaria para planificar experimentos posteriores más definitivos.

La posibilidad de que las condiciones en la zona de aplicación no sean uniformes también es a menudo ignorada. Siempre que se sospeche una variación significativa, se debe incluir en el diseño del estudio o en una serie de pruebas para determinar cuál de las subcondiciones reconocibles es significativamente diferente. Las pruebas con una nueva especie de árbol, por ejemplo, se deben efectuar en una amplia gama de climas y condiciones de suelo propias de la zona entera donde los resultados se aplicarán. Si los resultados

difieren de un lugar a otro, habrá conclusiones independientes para cada sitio y se deberán estudiar por separado.

Réplicas. La mayoría de las conclusiones de las investigaciones forestales no son definitivas sino que se basan en las probabilidades; esto es, el porcentaje total de instancias en que un fenómeno observado puede volver a ocurrir. Estas probabilidades se pueden determinar sólo mediante observaciones repetidas. Una verdadera réplica ocurre cuando las pruebas repetidas se ejecutan de manera semejante y bajo condiciones que representan la gama más amplia de posibilidades.

El número (n) de réplicas (o muestras) requeridas para obtener un grado deseado de exactitud puede ser definido con anticipación, siguiendo los siguientes pasos (Burley y Wood 1976):

1. Determinar (o estimar), a partir de observaciones preliminares, el valor medio (m) esperado.
2. Determinar la desviación estándar (s). Si existen observaciones preliminares, la raíz cuadrada de la suma de las desviaciones individuales a partir de la media se divide por su número menos 1. Si no hay observaciones preliminares, se toma un cuarto de la gama de valores mínimos y máximos esperados.
3. Determinar el coeficiente de variación (CV) dividiendo la desviación estándar por la media y multiplicándola por 100.
4. Seleccionar un grado de precisión (e), el número de unidades que constituyen una diferencia importante.
5. Seleccionar un nivel de probabilidad que se considere confiable, comúnmente 95 veces de cien.
6. Determinar un valor apropiado para la t de Student. Según se ve en los cuadros (Wenger 1983), el valor de " t " depende del número de réplicas, que es lo que se está determinando. Por consiguiente, el valor de " t " debe determinarse por ensayo y error. Sin embargo, para efectos prácticos, para un número de réplicas superior a 30, el valor de " t " equivale a 2 para un 95% de probabilidad (Cuadro 9-1).
7. Determinar el tamaño aproximado de la muestra elevando al cuadrado el producto de " t " por CV dividido por e^2 .

Por ejemplo, supongamos que se desea determinar la razón media del diámetro de copa a diámetro del fuste a la altura del pecho. La medida de unos pocos árboles típicos indica que el promedio debería ser aproximadamente 20 y que la gama debería variar de 10 a 30. La desviación estándar aproximada es 30 menos 10 dividido por 4. Esto significa que el coeficiente de variación es 100 veces 5 dividido por 25; o sea, 20%. Si el grado de precisión deseado para la razón es una cifra que esté a 2 puntos de la media (20), entonces e es igual al 10%. El valor pronosticado de "t", para una probabilidad del 95% y con un número estimado de réplicas de 40, es 2,02. La primera prueba para definir el número real de réplicas, por consiguiente, es el cuadrado de 2,02 por 20, o 1632,16, dividido por el cuadrado de 10, lo que da como resultado 16,3 réplicas. A continuación, se recalcula el valor de "t" correspondiente a 16,3 réplicas (2,12), lo que da como resultado 18,0 réplicas $(2,12 \times 20)^2/100$. Debido a las aproximaciones que se hacen, el número seguro de réplicas sería 20 o más.

Gran parte de los supuestos en la selección del tamaño de muestras para parcelas de investigación se puede obviar usando tablas de tamaños de muestras como función de un coeficiente estimado de variación y un error de muestreo dado usando varios niveles de confianza. Un juego de tablas ha sido publicado por Stauffer (1983); Burley y Wood (1976) presentan detalles adicionales y más precisos sobre el diseño experimental de investigaciones. El Cuadro 9-2 ofrece números aproximados de réplicas con base en los coeficientes de variación y precisión requeridos.

Cuadro 9-1.—Valores de t de Student (nivel de probabilidad del 95%) para varias réplicas en estudios de investigación

Réplicas	t	Réplicas	t
2	12.71	10	2.23
3	4.30	15	2.13
4	3.18	20	2.09
5	2.78	30	2.04
6	2.57	40	2.02
7	2.45	60	2.00
8	2.36	120	1.98
9	2.31		

Fuente: Wenger 1983.

Precisión. Las diferencias experimentales poco notables en pequeña escala mantendrán una proporción similar en escalas grandes. El proceso mencionado arriba tiende a multiplicar cualquier error de experimentación y, por lo tanto, puede fácilmente llevar a resultados inaceptables a gran escala.

La mejor protección contra ese problema es asegurar la precisión en las observaciones y en la medición de las reacciones (Fig. 9-3). Al menos tres niveles de medición merecen atención. Primero, en la medida de lo posible, los efectos medidos deben relacionarse directa y únicamente con las causas. Es necesario eliminar las influencias ajenas o indirectas para clarificar las verdaderas causas y efectos.

Segundo, los instrumentos usados para medir las reacciones se deben seleccionar por su confiabilidad en el nivel de precisión requerido. El hecho que un instrumento sea nuevo, complejo o sofisticado, no significa necesariamente que sea el más apropiado para un estudio en particular. Los instrumentos, además, deberían ser probados o calibrados bajo las condiciones precisas del experimento.

Se debe tener un cuidado especial cuando se toman medidas. Cuanto más precisas las lecturas, tanto más estrecha debe ser la supervisión. Los que hacen las lecturas no sólo deben estar capacitados para esa tarea, sino que también deben estar completamente convencidos de que es necesario obtener el nivel de precisión previamente definido y que el supervisor no aceptará nada menos.

Tercero, una vez recogidos los datos, deben interpretarse sólo hasta el nivel que la precisión permite. Las medidas

Cuadro 9-2.—Número aproximado de observaciones requeridas para una precisión especificada en experimentos basados en coeficientes de variación

Coeficiente de variación (%)	No. de observaciones para una precisión deseada (probabilidad del 95%)		
	±5 %	±10 %	±20 %
10	16	4	1
30	144	36	9
50	400	100	25

Fuente: Burley y Wood 1976.

tomadas en centímetros, no sirven para niveles de precisión en milímetros. Aún cuando las lecturas se pueden convertir a milímetros, no es válido generalizar a partir de las conversiones. Un ejemplo es la precipitación anual, sumada para el año o como promedio de varios años, y presentada al milímetro más próximo. Las lecturas de tormentas individuales o totales diarios se pueden medir al milímetro más cercano con el pluviómetro usado en ese preciso lugar y para el período preciso de medición. Sin embargo, cualquiera que mida la precipitación anual sabe que para distintos años los totales son distintos, no en milímetros sino que por lo general varían en muchos centímetros. Del mismo modo, un segundo pluviómetro, aún si se coloca cerca del primero, mostrará diferencias en centímetros a través del año. Por lo tanto, para la mayoría de los propósitos los datos sumados de precipitación en centímetros son tan significativos como los expresados en milímetros.

Los resultados de resúmenes de observaciones o comparaciones comúnmente se expresan en términos de medias de la muestra con una cierta medida de dispersión, como el error estándar (desviación estándar/ n). Para algunos propósitos prácticos, una cifra más significativa que la media de la muestra es “el cálculo mínimo confiable”, una cifra derivada al sustraer de la media de la muestra, el error estándar multiplicado por el valor de “ t ” para una probabilidad de 0,95 (Dawkins 1958d). Se espera que el cálculo mínimo confiable determinado de esta manera tendrá una probabilidad del 97,5%.

Si se desean comparar los resultados de investigación para una región tan extensa como el neotrópico, se requiere un nivel de confiabilidad semejante en los estudios. Esto no significa que se deba restringir el ingenio en el diseño de los estudios de aplicación a condiciones específicas del sitio. Sin embargo, una cierta similitud puede servir de guía en la definición de tamaños de parcelas y clases de alturas y diámetros, que ayuden a resumir el desempeño de los árboles, y otras cuestiones por el estilo.

Interpretación de resultados. La base fundamental de la interpretación es la observación. Mlinsek (1982) critica la tendencia de usar equipos caros de investigación en vez de la observación directa; según él, en el pasado la investigación forestal se apoyaba en observaciones e interpretaciones inteligentes que rendían buenos resultados cualitativos. Aún con instrumentos



Fig. 9-3.—Las evaluaciones precisas y repetidas de los bosques son fundamentales para adquirir nuevos conocimientos a través de la investigación.

sofisticados, todavía es esencial que los científicos mantengan un contacto permanente con la naturaleza de los bosques, lo cual puede ser exigente intelectualmente, pero modesto en términos del equipo necesario, y puede producir resultados iguales a los de las investigaciones de laboratorio.

La interpretación de los resultados de investigación requiere una comprensión amplia de todos los valores involucrados. La productividad de la plantación, por ejemplo, se expresa generalmente en términos de volumen (o fitomasa sobre el suelo) por unidad de superficie y tiempo. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, el volumen máximo por unidad de inversión o por unidad de empleo quizás sea más significativo (Wood 1974).

Las investigaciones comúnmente se emprenden más para comprobar algo que ya se sospecha o se cree, que para investigar una verdad completamente insospechada. A menudo se busca demostrar lo beneficioso que es aplicar algún nuevo descubrimiento al manejo. Pero, aún cuando ese no sea el caso, el investigador, al principio o a medida que el estudio progresa, podría estar tentado a prejuzgar e interpretar lo que no se ha demostrado conclusivamente. Ese impulso puede conducir a un sesgo en el diseño, ejecución o interpretación de la investigación. Cualquier satisfacción derivada de esta forma puede durar poco, porque tarde o temprano se comprobará que las decisiones basadas en conclusiones sesgadas son

deficientes, expuestas a errores costosos o a la corrección por otros investigadores más objetivos. La interpretación debe limitarse al alcance de las observaciones, aún si los resultados no logran alcanzar los objetivos del estudio. Tales limitaciones, abiertamente reconocidas y registradas, pueden estimular un mejor segundo intento, por los mismos o por otros investigadores.

Otro aspecto de la interpretación tiene que ver con los "indicios" no totalmente sustentados en mediciones (tales como diferencias poco probables a un nivel de confiabilidad del 95%), pero que sin embargo, forman parte de las impresiones que el investigador acumula durante un estudio. Estos indicios pueden conducir a hipótesis que explique los fenómenos observados y, por lo tanto, a nuevas y más beneficiosas líneas de investigación. Descripciones de tales impresiones constituyen un producto derivado de la pericia del investigador y tienen un lugar en la publicación de resultados científicos; la única condición es que se deben describir tal como son, y no como hechos científicamente probados.

Presentación. El propósito de la investigación es de obtener nueva información, pero ¿para quién? La consideración esencial que debe regir la selección de prioridades de investigación y la presentación de los resultados es el público al que van dirigidas. El público más obvio para la investigación en producción forestal es el practicante: el manejador de bosques, el agroforestal, o el propietario, quienes pueden aplicar los nuevos conocimientos a la formulación de políticas y al tratamiento de los bosques y terrenos arbolados. Una segunda audiencia es el público en general, cuyo apoyo es fundamental para gran parte de las investigaciones, pero que su interés por los detalles es relativo. Una tercera audiencia es la comunidad científica interesada en conocer las técnicas de estudios y los resultados técnicos, como base para mayores investigaciones.

La buena investigación debería tener algo que ofrecer a cada una de estas audiencias, aunque rara vez la investigación está dirigida a las tres. Los científicos tienden a dirigirse a otros científicos en términos poco conocidos para otros practicantes o para el público en general. Gran parte de las investigaciones, por lo tanto, no se promocionan en los círculos donde deberían ser aplicadas, o donde se podría conseguir un mayor apoyo. Corresponde al científico poner a disposición de todos los públicos los resultados de su trabajo; esto requiere

que se hagan presentaciones claras y simples, en distintos medios de comunicación.

Enfoque de la investigación

Un programa de investigación equilibrado generalmente está compuesto de varios estudios cuyo enfoque en conjunto se centra en problemas críticos. Este equilibrio normalmente se da en las investigaciones fundamentales a largo plazo y los estudios a corto plazo para resolver problemas inmediatos. Los estudios de largo plazo tienen que ver con las causas fundamentales de los fenómenos observados, tales como las variaciones en la productividad en distintos sitios. El equilibrio también se pone de manifiesto en la priorización de las investigaciones para determinar las posibilidades físicas, biológicas y técnicas, antes que la determinación de los límites o grado de factibilidad económica.

Clasificación de los bosques e inventarios forestales

Las clasificaciones climáticas y ecológicas de los bosques tropicales se han descrito en los capítulos anteriores. Son útiles porque enfatizan características claves que; 1) pueden ser comunes para los bosques separados por largas distancias o que son superficialmente distintos, 2) pueden distinguir entre bosques semejantes en apariencia. Pero tales clasificaciones son imperfectas y son un tema continuo de investigación en la región. Una de las limitaciones surge directamente de la tendencia de agrupar los bosques solamente con base en unos pocos parámetros de fácil medición. Los intentos por establecer sistemas de clasificación forestal universal han sido criticados por oscurecer tantas diferencias como semejanzas logran esclarecer (Grubb *et al.* 1963). Si bien se deben reconocer las grandes semejanzas, también se debe prestar atención a los cambios de asociaciones y a especies individuales que diferencian factores de sitio, como elevación, pendiente, aspecto y propiedades físicas del suelo. Una mejor comprensión de estas relaciones, a través de investigaciones, podría arrojar luz sobre las limitaciones y las posibilidades de un manejo forestal más adecuado en los países tropicales.

Los inventarios forestales en el neotrópico son un foco continuo de atención. Gran parte de la región nunca ha sido inventariada, y sin embargo, la protección racional y el manejo productivo se deben basar en evaluaciones forestales que sólo se pueden obtener mediante un inventario. A lo mínimo, los inventarios deben proporcionar datos confiables sobre la ubicación y

extensión de los bosques existentes, datos ahora derivados casi universalmente mediante la teledetección.

Por muy valiosa que esta información básica pueda ser, sólo sirve para establecer políticas forestales superficiales, lo que sugiere la importancia general de los bosques como forma nacional de uso de la tierra y para señalar dónde se deben concentrar los esfuerzos de investigación forestal. Para definir las tasas de aprovechamiento, identificar los sitios más productivos y determinar los rendimientos sostenibles, los bosques tropicales deben ser inventariados con mucho más detalle y más repetidamente a través del tiempo. Los inventarios continuos, que muestran cambios en el tiempo, generalmente se basan en mediciones repetidas de muestras representativas de los bosques.

Cuando se planificaba la conversión de los bosques de Uganda a un programa de manejo monocíclico de 70 años, los forestales encontraron que era esencial tener inventarios confiables basados en muestras bien planeadas y completas de la composición del suelo, la condición silvícola y el potencial productivo de cada zona (Hughes y Brown 1962).

El porcentaje del bosque a ser incluido en la muestra, los parámetros que se deben medir y la naturaleza del análisis dependen de cuánta información se requiere y cuán precisa debe ser. Para cálculos aproximados del volumen total de madera en pie, un muestreo del 2 al 5% puede ser suficiente, pero generalmente se requiere una muestra mucho mayor en bosques mixtos, donde el objetivo es estimar el volumen de árboles de cosecha, o de sólo una o pocas especies. Para producir esta información se necesita un inventario casi completo, debido a la ocurrencia irregular de cada especie en los bosques mixtos. Donde sea posible, la agrupación de especies en inventarios puede reducir no sólo tales irregularidades, sino también, en consecuencia, la intensidad del muestreo requerido para cualquier nivel de precisión definido. La intensidad de muestreo se puede basar en el coeficiente de variación, según se ha descrito previamente (Cuadro 9-3).

La intensidad de muestreo necesaria para lograr una confiabilidad dada se puede reducir subdividiendo el bosque heterogéneo en unidades más homogéneas. La heterogeneidad de los bosques mixtos se puede reducir para propósitos de muestreo estratificando de acuerdo a los factores ambientales, como elevación, tipo de suelo o tratamiento forestal anterior. Las variaciones en los

bosques se pueden distinguir por medio de la teledetección. En general, cualquier variación que puede ser trazada en un mapa es una fuente prometedora de posibles ahorros, en cuanto a la intensidad del muestreo en el campo, porque cada tipo (o clase) de bosque tiende a ser más homogéneo, y por lo tanto, el muestreo puede ser menos intensivo para un nivel dado de error probable.

Para cualquier inventario forestal, no importa cuán rutinario y repetitivo sea, existe una necesidad continua de evaluar las técnicas, además de los resultados, en busca de métodos mejores y más baratos. Para obtener datos detallados sobre los inventarios forestales, sus propósitos, diseños, técnicas de muestreo, teledetección, medidas, registro, procesamiento e interpretación de datos, se refiere al lector al manual de la FAO (Lanly 1973). Para pruebas de especies arbóreas, una buena referencia es Briscoe (1990).

Ecosistemas forestales. Antes de tomar decisiones racionales sobre si se debe y cómo modificar los bosques tropicales para estimular la producción, uno debe estar al tanto de cómo operan y funcionan naturalmente los ecosistemas no modificados (Assman 1970). Por ejemplo, se debe entender la regeneración bajo condiciones no perturbadas para saber qué esperar de la regeneración bajo condiciones perturbadas, debido a la extracción de madera (Richards 1957). De igual manera, en los bosques secundarios, el estudio de la

Cuadro 9-3.—Error probable en un muestreo de suelos en inventarios forestales (%)

Tamaño del bosque (ha)	Error probable de las distintas muestras		
	1 %	5 %	10 %
Coeficiente de variación 15%			
40	14.9	6.5	4.5
400	4.7	2.0	1.4
4,000	1.5	0.7	0.4
Coeficiente de variación 60%			
40	59.8	26.2	18.0
400	18.9	8.3	5.7
4,000	6.0	2.6	1.8

Fuente: Meyer *et al.* 1961.

sucesión natural de las especies puede guiar la silvicultura (Hall y Okali 1979).

Dada la heterogeneidad de los ecosistemas forestales tropicales, la investigación podría ser menos fructífera en cuanto a descubrimientos universales que en la búsqueda de las causas de diferencias (Levins 1968). El desafío es encontrar maneras de tratar a los sistemas naturales para el beneficio humano, sin perder la rica fuente de datos biológicos que contienen (Farnworth y Golley 1973). La investigación se debe dirigir al rendimiento sostenible de beneficios o productos útiles, lo que significa que nuestras acciones no deben disminuir la productividad, riqueza o estabilidad a largo plazo.

Un equipo de trabajo del Instituto de Ecología determinó que los siguientes requisitos son de alta prioridad en la investigación ecológica de los bosques tropicales (Farnworth y Golley 1973):

- Estudios sobre la morfología, fisiología, conducta y estructura de las poblaciones de los bosques.
- Presupuestos del tiempo y energía de organismos individuales y de las poblaciones; tasas y estrategias de adquisición y gasto de energía.
- Historia de vida de la flora.
- Rendimientos orgánicos potenciales, productividad, descomposición y reciclaje.
- Relación entre diversidad y estabilidad.
- Límites de tolerancia del estrés sin pérdida de la capacidad de recuperación.
- Dinámica de los nutrientes en el tratamiento, destrucción y recuperación del bosque.
- Enfoque de sistemas en el manejo de plagas.
- Técnicas de investigación.

Otras recomendaciones para fortalecer la investigación ecológica en los bosques tropicales (Brunig *et al.* 1975) son las siguientes: 1) naturaleza y cantidad de flujos y reflujos, 2) estructura, funciones e interacciones de la flora y la fauna, 3) ciclo y descomposición de nutrientes y el rol de los micorrizas, 4) interrelación entre especies y sitios, 5) interrelaciones entre sistemas terrestres y acuáticos, 6) reacción de la estructura natural del ecosistema y sus funciones a la variación ambiental y

la interferencia humana, 7) desarrollo de modelos de predicción.

Los datos básicos sobre la estructura y composición del bosque se consideran esenciales para el entendimiento del manejo de los bosques mixtos de Malasia, debido a la tendencia de aumentar la representación de especies de árboles comerciales y el cambio hacia cultivos de edad más uniforme (Wyatt-Smith 1966).

Historia de vida de los árboles. A pesar de que se necesitan estudios de los ecosistemas en general, se aprende mucho estudiando las historias de la vida de especies individuales que lo componen. Eso se debe en parte a que el cultivo de bosques mixtos con base en distintos objetivos de manejo, generalmente favorece a algunas especies, a expensas de las demás. Entonces, como resultado de tal selección, el desempeño del sistema o del rodal tiende, en conjunto, a reflejar el desempeño de especies seleccionadas que gradualmente van siendo más relevantes.

Para cada especie se necesitan varios tipos de datos. El primero es la "identidad" de la especie, incluyendo cualquier variante de la raza, características taxonómicas y nomenclatura de la especie, tanto en términos científicos como en nombre común. Segundo, se deben investigar los factores ambientales que parecen críticos para su ocurrencia y bienestar. Entre ellos se halla el clima, incluso la severidad de las heladas y las sequías; los suelos, particularmente los factores físicos, como profundidad y porosidad, y el suministro de nutrientes (Richards *et al.* 1939).

Tercero, también se debe determinar la naturaleza de los bosques donde la especie ocurre (o está aparentemente bien adaptada). Debe incluirse información sobre cierre del dosel, tamaño de los claros, intensidad de la sombra, y estratos que pueden ser el hábitat primario de la especie. Las especies asociadas también son significativas, como también la ocurrencia relativa de la especie en bosques primarios o bosques con varias etapas de sucesión.

Cuarto, el hábito mismo de las especies también es importante, incluso la forma, tamaño al alcanzar la madurez, peculiaridades de la corteza, gomas, tipo y tamaño de hojas, carácter caducifolio, florecimiento, polinización, fructificación, mecanismos para el transporte de semillas, mecanismos de establecimiento y crecimiento a lo largo de la vida, y relación con el ambiente.

Bajo la categoría de “información silvícola” se encuentran las reacciones de los árboles a las prácticas silvícolas, datos que se pueden derivar en parte de la conducta de la especie en la naturaleza. Otra información relacionada incluye adaptabilidad a la regeneración artificial, peligros externos (pestes y quebraduras), reacción a distintos tratamientos silvícolas y tasas de incremento volumétrico (Fanshawe 1947a, 1947b, 1948; Kadambi 1954, Soerianegara 1973). Un compendio de detalles silvícolas sobre los árboles de Trinidad y Tobago presentan las siguientes categorías de datos (Marshall 1939): distribución y hábitat, descripción botánica, germinación, desarrollo del plantón, características silvícolas y utilización. En Ghana (Taylor 1960), la información incluye nombres científicos, comunes y comerciales, descripción botánica, usos, distribución, fenología, semillas y plántones, abundancia y condiciones de regeneración natural.

El Grupo de Estudios Silviculturales de la Comisión Forestal de América del Norte ha desarrollado, a partir de otras fuentes, un bosquejo completo de información silvícola, el cual puede servir como guía para la región (Apéndice M). Casi el mismo bosquejo se está usando en el Manual Silvícola de Árboles Tropicales Americanos, que el IITF de Puerto Rico está preparando (Francis 1984 hasta el presente).

La identificación de campo generalmente se basa en más caracteres de los que se usan para la clasificación taxonómica. Los caracteres identificadores deben estar visibles a través del año. Algunos ejemplos comunes (Allen 1956, Rosayro 1954) incluyen forma de copa, forma del fuste, gambas, raíces fúlcreas, espinas, dehiscencia de la corteza, escamado de la corteza, color de la corteza, exudaciones (látex), corteza de distintos colores, cambio de color de la corteza interior al ser expuesta, color distintivo de la capa intermedia de la corteza, estriado de la corteza interior, olor o gusto distintivo de la corteza o madera y presencia de hormigas de aguijón. Tales datos usados en la preparación de claves de campo es fundamental para las investigaciones de la región (Dubois 1971).

El estudio de la regeneración natural de los árboles tropicales todavía está en su infancia. En general, se sabe poco de cómo se reproducen la mayoría de las especies sin la intervención humana, o cómo estimular el proceso. En la India y en lo que hoy es Malawi, la regeneración natural se convirtió en una práctica silvícola aceptada, décadas antes de que los dasónomos reconocieran que se sabía poco o nada sobre el proceso

reproductivo y que se necesitaban mayores investigaciones (Hursh 1960, Nair 1960).

La investigación de la regeneración bajo condiciones naturales se basa en la necesidad de información básica (Stern y Roche 1974). Sin embargo, el estudio de la regeneración (o su ausencia) bajo condiciones modificadas típicas de los bosques tropicales explotados o secundarios puede resultar más útil. Además, debido a que los problemas de la regeneración natural no son solamente los de reclutamiento, existe la necesidad de un desarrollo armonioso de tecnologías para el inventario y manejo de la regeneración (Dubois 1971).

Entender la reproducción natural de las especies claves es fundamental para la silvicultura y el manejo de los bosques naturales. Una reunión de la Comisión Forestal del Asia y el Pacífico de la FAO en 1960 recomendó que la investigación debiera determinar primero la ecología de las etapas juveniles de las especies de árboles económicamente atractivos (Anón. 1960a). Se vio la necesidad de desarrollar técnicas para determinar la abundancia de la regeneración presente, en relación con la necesaria para un manejo forestal sólido.

Los estudios de la regeneración natural empiezan lógicamente con la fenología, el momento oportuno en que el árbol madura y la época de floración y fructificación. Debido a que la mayoría de las plantas tropicales dependen de los animales, al menos para una fase de su ciclo reproductivo, es particularmente importante emprender estudios de polinización y dispersión de semillas en ambientes naturales, de ser posible, antes de que hayan modificaciones (incluyendo las causadas por abejas invasoras) (Frankie *et al.* 1974b).

Aunque el carácter heterogéneo de la mayoría de los bosques tropicales resulta de mecanismos que inhiben el desarrollo de grupos concentrados de las mismas especies, el hecho es que muchas especies sobreviven con éxito en bosques puros o casi puros. Algunas son de crecimiento rápido y larga vida, lo que sugiere que deben ser excepcionalmente aptas para una producción intensiva (Whitmore 1981). Mediante la investigación debe aclararse cómo evitan tales especies las enfermedades y epidemias y qué mecanismos son responsables del crecimiento rápido.

En general, faltan datos sólidos para el manejo de especies de árboles. García Gutiérrez (1976) esbozó los componentes principales de una historia de vida ; junto

con la descripción del árbol adulto y su extensión geográfica natural, presenta datos sobre la biología de las flores (incluso el período y duración del florecimiento), mecanismo que produce el florecimiento, mecanismos y agentes de polinización, período de maduración de la fruta, naturaleza de la fruta, cantidad de frutos por árbol y de semillas por fruto. Una secuencia natural incluye detalles sobre la durabilidad y dispersión de las semillas, necesidades para la germinación, proceso de germinación, destino de las plántulas y desarrollo del árbol hasta alcanzar la madurez.

Se han publicado historias de la vida de pocas especies de árboles tropicales; entre ellas, *Pentaclethra maculosa* y *Stryphnodendron excelsum* en Costa Rica (Hartshorn 1972), *Cecropia peltata* (Silander 1979), *Schefflera morototoni* (Neives 1979), *Buchenavia capitata* (Sastre de Jesús 1979) e *Inga vera* (Muñiz-Meléndez 1978) en Puerto Rico. Todos estos estudios se efectuaron durante un breve período de tiempo, por lo que faltan datos significativos sobre las razones y causas de la mortalidad eventual. El estudio de *P. maculosa*, con base en 4 ha de bosque, determinó la tasa de reducción del número de árboles por unidad de área al aumentar la altura o el diámetro de los árboles. A partir de esto se dedujo la tasa de mortalidad relativa en el paso de una clase de tamaño a la siguiente.

Crecimiento de los árboles. La evaluación de los ecosistemas forestales no se limita a la determinación de las condiciones actuales. Más esquivada y valiosa a largo plazo es la información sobre el carácter y tasa de cambios que pueden estar ocurriendo, particularmente en relación con el incremento volumétrico de los componentes potencialmente económicos del rodal. Los primeros monitoreos de los bosques tropicales tuvieron lugar en lo que hoy es Malasia. Los datos sobre el crecimiento de árboles se derivaron con mediciones repetidas de especímenes seleccionados a lo largo de transectos permanentes (Watson 1934).

En 1958, se desarrollaron técnicas de medición para determinar lo siguiente (Wyatt-Smith 1958b):

- Volumen de madera de tamaño comercial para propósitos de manejo (censos comerciales).
- Composición y distribución de las clases del tamaño de árboles y plántulas (enumeración de árboles comerciales y parcelas botánicas).

- Estructura del bosque (perfil).
- Frecuencia y distribución de los mejores plantones de regeneración de especies de valor económico por unidad de superficie (muestreos de la regeneración antes y después del aprovechamiento).
- Desarrollo (mediciones repetidas de parcelas botánicas de marcación permanente).

En los bosques aprovechados, el muestreo lineal se puede usar para decidir el tratamiento silvícola preliminar; la intensidad de muestreo generalmente varía de 2,5 a 10,0%, dependiendo del tamaño del árbol. Cuando se decide efectuar un tratamiento se establecen parcelas para evaluar los efectos. Las unidades son de 20 m x 200 m, y dentro de ellas, se hacen submuestreos de árboles de menos de 10 cm dap. Las unidades se agrupan en un diseño de bloques al azar en lugares seleccionados con base en cualquier criterio ajeno al tratamiento. En general la topografía impide que las unidades se dispongan en forma cuadrada (Wyatt-Smith 1958b). En los bosques pluviales de Malasia, las parcelas largas y estrechas son más eficaces para lograr una distribución normal del área basal que las de forma cuadrada (Cousens 1958). Las franjas más satisfactorias son de 20 m de ancho y de 100 a 400 m de largo.

En Surinam, el muestreo para tamaños de árboles y distribución de especies se hace en cuadrados de 10 m x 10 m, que se ubican a lo largo de líneas o agrupados en cuadrados de 1 ha (Schulz 1960). Se descubrió que las diez especies principales podían ser evaluadas adecuadamente usando de 50 a 100 cuadrados. El parámetro más decisivo es la cantidad de árboles que alcanzan un dap de 25 cm.

Uganda ha tenido una larga experiencia en el desarrollo de técnicas para medir el bosque alto, y se ha llegado a la conclusión de que el único método para estimar el crecimiento es efectuar mediciones repetidas del rodal entero (Dawkins 1958d). El segundo método es usar parcelas permanentes de muestreo; aún dentro de estas, es difícil medir todos los árboles. Todo se debe marcar, incluso las malezas, y tanto la pintura como los clavos presentan problemas de durabilidad. El crecimiento y la mortalidad se deben registrar simultáneamente, una tarea menos ardua si se concentra sólo en los árboles seleccionados. Si la cosecha final de los árboles maduros no debe tener más de 50 fustes por hectárea, sólo se deben registrar dos por parcela de 20 m x 20 m.

La práctica en Uganda es usar parcelas de rendimiento de 100 m², situadas en pares al azar, dos por 250 ha. Cada parcela se subdivide en 25 cuadrados dentro de los cuales se miden los cuatro mejores árboles. Cada árbol medido se rotula, aún si no es más grande que un brinjal o plantón. Con este sistema se obtiene un panorama adecuado del bosque.

En Uganda se desarrolló una secuencia lógica de la técnica del muestreo, comenzando con un examen físico, luego un examen biológico y un examen de producción (Dawkins 1958d). El examen físico, de naturaleza exploradora, estima la población de árboles; con un muestreo dinámico se determina el reclutamiento, crecimiento y mortalidad.

El procedimiento de monitoreo más simple usado en Uganda se centra en las parcelas de crecimiento, cuyo propósito es determinar la influencia del paso del tiempo sobre las especies deseables. Para tal fin se necesitan en cada sitio no más de diez árboles de cualquier clase de diámetro. Los árboles se escogen por su valor potencial como madera de aserrío. Se pinta un anillo en el punto donde se toman las medidas, y estas se repiten a intervalos de 1 a 5 años para diámetros desde 0,1 cm dap. Los árboles individuales son clasificados por la forma y posición de la copa (Dawkins 1958d).

El monitoreo de la producción en Uganda requiere que los árboles se clasifiquen por el uso (Dawkins 1958d). Los que se consideran "deseables" incluyen árboles que producen maderas de primera y segunda calidad y maderas desconocidas de valor potencial. Los árboles "indeseables" incluyen los proscritos (sin valor conocido), las malezas, árboles defectuosos y los que impiden el crecimiento de árboles deseables.

La ausencia de anillos de crecimiento confiables en la madera de la mayoría de los árboles tropicales ha obligado a emprender una tarea de largo plazo para determinar las tasas de crecimiento. Se han hecho esfuerzos por acelerar el desarrollo de esta información, pero los procesos son complejos y de confiabilidad incierta. Los mejores resultados todavía se logran con mediciones repetidas en las mismas áreas o árboles.

Nuevos y más precisos métodos para medir el crecimiento diamétrico surgieron con el uso de la cinta vernier (para medir el dap) y el dendrómetro fijo (un instrumento para medir las dimensiones de los árboles). Este último, sin embargo, se debe instalar y alcanzar una

tensión estable con un año de anticipación para que las medidas sean confiables (Bower y Blocker 1966). Para estudios especiales, el xilema de los árboles escogidos puede ser pinchado a través de la corteza con una aguja dejando una marca permanente contra la cual se puede medir el crecimiento (Wolter 1968).

Un intento efectuado en Cuba para determinar la edad de árboles en plantaciones mediante los anillos de crecimiento, indicó que, al menos para algunas pocas especies, el margen del error no era muy grande (González Rondón y Eremeev 1976). El número medio de años por anillo de crecimiento (coeficiente de edad) era de 0,8 para *P. caribaea*, 0,9 para *P. tropicalis*, 0,9 para *Cedrela odorata* y 1,0 para *Eucalyptus saligna*, *Hibiscus elatus* y *Swietenia* spp. Otros estudios no han alcanzado tanta certidumbre sobre el número de anillos claramente visibles.

En el clima muy estacional del norte de Australia, tres especies de *Eucalyptus* forman anillos anuales nítidos (Mucha 1979). Sin embargo, para determinar la edad de los árboles, se necesitan materiales cuidadosamente seleccionados. A medida que el árbol envejece, la anchura y precisión de los anillos exteriores se reduce. Estos descubrimientos sugieren que se deben evaluar los anillos de otros eucaliptos que viven en climas secos.

Un índice sensible sobre la condición y cambios del bosque es la diversidad, el número de especies forestales por unidad de área. En bosques sin modificar, entre más especies hay, tanto más favorables se supone que son las condiciones. Hasta qué punto las especies están igualmente representadas (en vez de ser comunes algunas y raras otras) también se reconoce como un índice de diversidad. Una medida de esta tendencia es la función de Shannon-Weiner, obtenida al multiplicar el porcentaje de todos los árboles que una especie representa por el logaritmo natural del mismo porcentaje, cambiando el signo de menos a más y sumando el resultado para todas las especies (Boyce y Cost 1978). Cuanto mayor el resultado, tanto mayor la cantidad de especies y más uniformes sus grados respectivos de representación, lo que se considera el mayor grado de diversidad.

El monitoreo es especialmente útil en bosques secundarios como guía de manejo durante las etapas iniciales de recuperación de las perturbaciones (Richards 1955). Las etapas sucesionales indican el nivel de restauración del suelo.

Con el monitoreo de los cambios pasados o actuales se puede predecir lo que se espera en el futuro. Los métodos de inventario no deben sólo medir la composición actual y la cantidad de las existencias en crecimiento, sino que también deben indicar la tasa de crecimiento potencial bajo tratamientos forestales alternativos (Bunn 1968).

La predicción de las consecuencias de la intervención humana en los bosques tropicales húmedos es limitada por lo poco que se sabe de los sistemas forestales tropicales. Es posible que las observaciones se basen en analogías no comprobadas con otros sistemas. Los enfoques predictivos experimentales tardan mucho tiempo y son costosos. El enfoque preferido es la simulación por computadora, que usa mediciones reales para comparar el potencial de distintas estrategias (Goodall 1975). El uso de regresiones múltiples permite la cuantificación del efecto relativo de variables independientes y distintas, sobre las variables dependientes, al menos durante períodos en que no hay interferencias externas (Dawkins 1964b). No cabe duda de que es necesario encontrar una correlación más fuerte entre las medidas externas de los árboles y el rendimiento esperado.

El efecto de la competencia sobre los árboles individuales parece estar estrechamente vinculado con las tasas futuras de crecimiento. Una expresión de tal competencia es el conteo de área, una medida matemática del traslape de las copas, basada en un área basal de aproximadamente 10 m²/ha (Opie 1968). Suponiendo que la zona de influencia de cada árbol corresponde a un círculo cuyo tamaño se obtiene en función del dap, se pueden determinar las zonas teóricas de traslape de las copas. Estas técnicas son de utilidad principalmente en las investigaciones, pero quizás más adelante se desarrollen aplicaciones prácticas de campo.

Otro índice para determinar la competencia se ha ensayado en la zona templada: el "área potencialmente disponible". Esta es el área de un polígono alrededor de cada árbol, la cual se obtiene mediante puntos a lo largo de líneas que van del árbol en cuestión a cada uno de sus vecinos; la ubicación de cada punto se determina como proporción de los dap respectivos (Moore *et al.* 1973). En un ensayo, este índice explicó entre el 61 y 71% de la variabilidad del crecimiento.

Parecería más lógico controlar los cambios en el bosque a partir de componentes individuales, como índices de

constancia o cambio. Sin embargo, el significado de tales descubrimientos quizás sea difícil de interpretar. La extrapolación de datos de árboles individuales para determinar los efectos del grupo en el ecosistema es un proceso lógico muy complejo que puede inducir a error. De hecho, en sistemas vegetales muy diversos, el enfoque autoecológico o fisiológico puede no ser el mejor punto de partida para una investigación (Webb 1968). Los parámetros fisiológicos de cualquier comunidad quizás no resulten del mero hecho de juntar elementos dispares; quizás sea imposible escoger indicadores significativos sin perder mucho tiempo en intentos inútiles. Un enfoque más prometedor podría ser el estudio de comunidades de plantas, su sucesión y relaciones dinámicas (Webb 1968).

Las dificultades de caracterizar los bosques tropicales mediante árboles individuales se complica aún más por las diferencias aparentemente irreducibles en el comportamiento de árboles individuales debido a la gran variación entre sitios y a la estratificación de bosques complejos (Mervart 1969). Cada árbol está sujeto a distintas probabilidades de aceleración y deceleración del crecimiento y de la mortalidad. Para tomar todos estos factores en cuenta, se deben observar muchos árboles por un largo tiempo, y aún así, el proceso de sintetizar la representación del bosque entero podría ser problemático.

No deberían sorprender las dificultades en el proceso de aislar causas y efectos en los ecosistemas complejos. Existen muchas evidencias de que la supervivencia y el bienestar del sistema en su totalidad son determinados por interacciones sutiles entre los distintos componentes. Ningún comportamiento individual responde a una sola, o quizás aún a pocas causas.

Silvicultura. Se sabe tan poco sobre los efectos de los tratamientos silvícolas en los bosques naturales mixtos de los trópicos que no se pueden predecir los resultados de los extensos programas silvícolas. Tres líneas de investigación — que se indican a continuación — prometen dar un alcance más amplio para la silvicultura tropical (Synnott 1979):

- Los mercados para especies de maderas poco usadas y otros productos menores.
- Las prácticas de tala y extracción que mejor conservan el potencial productivo de los bosques bajo aprovechamiento.

- La corta de trepadoras antes y después del aprovechamiento, con el fin de reducir el daño causado por la tala y aumentar la productividad subsiguiente.

Otra determinación de necesidades de investigación silvicultural en bosques naturales se refiere específicamente a los bosques dipterocarpáceos, pero es de interés general (Ashton 1978b). Según el autor, todavía no se había emprendido la investigación necesaria para asegurar rendimientos sostenidos en bosques mixtos de dipterocarpáceas. Es posible que la sobrexplotación de los bosques naturales en épocas de precios favorables impida la regeneración natural; en tanto que las plantaciones solamente funcionan en buenos sitios donde deben competir con la agricultura. Las investigaciones son necesarias para comprobar en qué medida las comunidades rurales dependen de los bosques. Las reservas forestales, por su parte, deben crearse antes de que se modifiquen las relaciones ecológicas que pueden servir de guía para el manejo.

En los bosques dipterocarpáceos de Sabah, las siguientes cuatro líneas de investigación se han considerado las más importantes (Fox 1967b):

- Estudio del bosque virgen para guiar el establecimiento de reservas de muestras representativas y para ubicar y evaluar el volumen de madera disponible.
- Evaluación de la regeneración vieja en bosques talados.
- Determinación del desempeño de las plántulas de las especies más problemáticas.
- Manejo de la vegetación competidora como posible fuente de celulosa industrial.

Los estudios de la regeneración natural y su reacción a los tratamientos silvícolas pueden ser pertinentes para gran parte de la región. La técnica desarrollada en Uganda para monitorear las semillas y plántulas de regeneración natural alrededor de árboles semilleros puede ser de interés (Dawkins 1955a). Alrededor de cada árbol se limpian franjas de 2 m de ancho en cuatro direcciones justo antes de la caída de las semillas; luego, las franjas se dividen en cuadrados para medir el número, cantidad, tiempo y dirección de caída de las semillas, germinación y supervivencia eventual. De esta

forma se pueden revisar cientos de semillas por metro cuadrado.

Las investigaciones silviculturales en bosques altos de Uganda condujeron a estudios de clasificación de los componentes del rodal y al establecimiento de parcelas de diferentes tamaños (Dawkins 1957). Los estudios de plántulas y pequeños brinzales registran árboles de 15 cm a 2 m de alto por clases de altura: la primera clase es de 15 a 33 cm y las clases siguientes aumentan de 33 cm cada una hasta alcanzar 2 m. Los estudios de arbustos y especies de los estratos inferiores consideran brinzales de más de 5 cm dap y 2 m de altura; y los latizales con 5 a 20 cm dap se registran en clases diamétricas de 2,5 cm. Los estudios del estrato superior o del dosel registran árboles de más de 20 cm dap; las circunferencias se miden con cinta de metal hasta una aproximación de 0,25 cm. A los árboles medidos se les pinta un anillo en el punto mismo de medición con pintura permanente para asegurar que las mediciones subsiguientes sean comparables. Los árboles se clasifican por la condición y calidad de la copa.

El tamaño mínimo de las parcelas de Uganda ha sido un cuadrado de 20 m x 20 m (Dawkins 1957). Para los estudios de regeneración y supervivencia de árboles de hasta 20 cm dap se usan cuadrados únicos. Para analizar los efectos silviculturales en el estrato inferior se usan parcelas de 10 m x 100 m o de 60 m x 80 m, y se ubican dos cuadrados al azar en cada parcela. Para un tratamiento más extenso del sotobosque se puede ubicar cuatro cuadrados dentro de un cuadrado de 80 m x 80 m. Para estudios del estrato superior sin talarrasa, se ubican nueve cuadrados en el centro de una hectárea cuadrada. Para tratamientos drásticos del dosel se evalúa un área de 400 m x 400 m a lo largo de dos transectos de 20 m de ancho, cada una con 20 cuadrados.

Para experimentos que miden las reacciones (en términos de crecimiento) a los tratamientos, el tamaño de la parcela se debe basar en el número de árboles que deben quedar al final del experimento, después de raleos repetidos u otros tratamientos. En Europa, la práctica recomendada es usar parcelas replicadas con no menos de 100 árboles medidos cada una (Assman 1970). En bosques tropicales mixtos donde se estudian unas pocas especies, un requisito tal podría dictar parcelas muy grandes o transectos largos.

En un simposio realizado en la India en 1965 se recomendaron las siguientes prioridades de investigación para el bambú (Anón. 1965g):

- Comportamiento del crecimiento y desarrollo de la cepa, edad de máximo contenido de celulosa; solidez y longevidad de las cañas; desarrollo de las raíces y competencia con árboles vecinos; floración y medidas para demorarla o inducirla.
- Necesidades de nutrimentos, absorción y reciclaje.
- Ecología del florecimiento gregario.
- Identificación analítica del bambú.
- Propiedades de resistencia relacionadas con la edad y localidad.
- Especies arbóreas idóneas para ser mezcladas con el bambú.
- Técnicas del inventario.
- Estadísticas de crecimiento y rendimiento.
- Mejoramiento genético.
- Ciclos óptimos de corta e intensidad de la tala.
- Técnicas para reducir la congestión de la cepa.
- Efectos de los fertilizantes.

Adaptabilidad de las especies

La gran cantidad de especies arbóreas (tanto nativas como exóticas) que crecen bien en los climas tropicales y la gran variedad de condiciones de los sitios han conducido a extensos programas de ensayo y error con resultados contradictorios. Se han usado semillas con muy poca información sobre las especies, que han resultado en plantaciones en sitios improbables y el consecuente rechazo de especies con base en evidencias poco concluyentes. Los resultados de plantaciones a gran escala, basadas en pruebas de este tipo, son evidentes en Puerto Rico, donde después de plantar 65 millones de árboles durante 37 años, sólo el 3% seguía en pie en 1958 (Marrero y Wadsworth 1958).

Un enfoque más sistemático para ensayos de especies se usó en 1962, en lo que hoy es Zambia (Cooling 1962b).

El enfoque consistió de los siguientes pasos: 1) selección de especies con base en datos publicados, 2) introducción y ensayo preliminar, 3) determinación del crecimiento y rendimiento, 4) respuesta a variaciones edáficas.

Las pruebas preliminares se efectuaron en dos parcelas contiguas de 0,4 ha, a excepción de sitios donde la variación era más pronunciada. En otros lugares, quizás se necesiten más réplicas. Donde los cambios estacionales eran mayores se necesitaron réplicas durante un período más largo. El espaciamiento era generalmente 1,8 m x 1,8, o 1,8 m x 2,7 m donde era posible la limpieza mecanizada. Se evaluaron parcelas de 35 a 64 árboles para determinar la supervivencia, vigor, salud y forma; anualmente se midieron el dap y la altura de los árboles durante los primeros cinco años. A esa edad ya se podía seleccionar las especies. En algunos casos fue necesario continuar las observaciones durante 10, y aún 15 años (Cooling 1962b).

Las parcelas de crecimiento y rendimiento de este estudio se usaron sólo para especies seleccionadas en las pruebas iniciales, y fueron de 1 ha cuadrada, con una parcela interior de medición de 0,2 ha. Estas parcelas no se replicaron pero se situaron lo más representativamente posible. Se midieron la altura, el dap, la forma y el vigor. El volumen raleado se midió para facilitar la determinación del rendimiento. Esta información ayudó en la selección final de las especies y permitió clarificar los beneficios y costos del raleo y la poda, así como la rotación probable (Cooling 1962b). Finalmente, se efectuaron ensayos de uniformidad en diferentes condiciones del sitio para comparar desempeños.

Las experiencias con ensayos de especies en Kenia se basaron en un enfoque distinto (Edwards y Howell 1962). El primer paso fue de desarrollar un "arboreto" donde se establecieron unos pocos árboles de cada especie prometedora para determinar si eran adecuados para efectuar otras pruebas. Las especies promisorias se establecieron en "huertos forestales" bajo condiciones favorables, para evaluar hábitos de crecimiento y desempeño. Luego, se efectuaron experimentos con árboles en parcelas ubicadas al azar en pares o en mayores cantidades. El paso final fue establecer plantaciones en gran escala.

Estas experiencias demostraron lo importante que es clarificar de entrada los objetivos de plantación,

clasificar los climas y suelos y obtener toda la información disponible sobre la nueva especie. En lo posible, se buscó trabajar con semillas de al menos tres procedencias lejanas entre sí. No se perfeccionó el tratamiento de las semillas ni las prácticas de vivero hasta que los primeros ensayos comprobaron la idoneidad de las especies (Edwards y Howell 1962).

En el África oriental, se pensó que la etapa de arboreto involucraba demasiadas especies como para que sus resultados fueran útiles y por lo tanto, generalmente no se usaba (Leuchars 1962). En el segundo paso se usaron parcelas de 0,04 ha, que eran más simples y evitaban “un alto virtuosismo estadístico poco relevante”. En este paso se pueden usar bloques al azar, completos o incompletos. Así, si la cantidad de plantones disponibles es limitado, no es necesario ensayar todas las especies en todos los sitios. Generalmente, se efectuaron pruebas en más de un sitio, pudiendo haber varias réplicas por sitio o por tiempo. Si se tienen de cuatro a siete especies, el uso de cuadrados latinos es más preciso que el de bloques al azar, porque el número de especies, filas y columnas son iguales. De otro modo, se puede usar un diseño de cuadrados latinos incompletos. El uso de parcelas divididas puede servir para varios años de plantado en cada cuadrado del cuadrado latino o patrón de bloques. La última fase tiene que ver con el espaciamiento, poda y raleo; esta es de mayor escala y quizás requiera menos réplicas (Leuchars 1962).

La práctica en Uganda ha incluido parcelas de arboreto de 10 m x 10 m, con 25 árboles por especie. Las mediciones de altura se limitan a dos árboles dominantes por parcela (Kriek 1967a hasta 1967h). Para ensayos de especies, se usó una serie de parcelas cuadradas de 0,04 ha, donde se plantaron 64 árboles con espaciamientos de 2,4 m x 2,4 m. Se midió dap y altura de los 16 árboles interiores de la muestra; se comenzó con un dap de 7,5 cm y se remidió cada dos años. Los incrementos medios anuales se determinan periódicamente.

En la India, se han efectuado ensayos de eliminación de especies para dos a cuatro árboles con seis réplicas. Se usaron bloques incompletos de no más de 0,5 ha (para evitar variaciones locales de sitio) (Ganguli 1967). En los ensayos con pinos, se reconoce la importancia de las procedencias y de la presencia de micorrizas.

Los ensayos de especies en tres etapas fueron propuestos por Morandini (1968). La primera etapa, pruebas de eliminación, puede involucrar muchas especies con muchas repeticiones en varios sitios. A continuación se establece una red de parcelas experimentales con las especies más prometedoras a una escala suficiente como para poder determinar el volumen de producción. Finalmente, se efectúan pruebas con cada especie escogida para determinar cuáles son las mejores procedencias.

El diseño de los ensayos de especies se ha desarrollado de manera independiente en varios países tropicales durante los últimos 20 años. Cinco preceptos parecen ser de aplicación universal (Briscoe 1990): 1) definir el rango de condiciones de la prueba, 2) limitar cada estudio a no más que unos pocos tratamientos simples; 3) ubicar los tratamientos al azar, de modo que la variación entre los bloques sea mínima, 4) replicar cada tratamiento (preferiblemente cuatro veces), 5) registrar todo lo programado y ejecutado.

Los ensayos de especies con eucaliptos han arrojado la recomendación de cuatro principios (Anón. 1963c): 1) los rodales de donde se obtienen las semillas se deben describir cuidadosamente, 2) las prácticas de vivero para cada especie deben ser comparables, 3) los estándares del rechazo deben ser uniformes para todas las especies, 4) las pruebas de eliminación de especies deben abarcar la más amplia gama de sitios. El cumplimiento de este último requisito pasa por un levantamiento detallado del terreno, e incluso descripciones del clima, tipo de suelo, topografía e historia del uso del terreno. Las pruebas posteriores de crecimiento se pueden efectuar en un número más limitado de sitios, pero con la variación más extensa posible.

En el caso de los eucaliptos, las parcelas para pruebas de eliminación de cuatro, seis o nueve árboles han sido suficientes en algunas zonas, sin necesidad de hileras de protección (Anón. 1963c); lo que se hace es dejar hileras en blanco entre parcelas. Por el contrario, las pruebas de crecimiento han requerido parcelas de 16 a 100 árboles, dependiendo de la rotación del estudio. Generalmente, las parcelas cuadradas son aceptables porque minimizan la competencia intra-parcela a lo largo de un borde dado, aunque eran necesarias las hileras de protección y tener más de una parcela de cada especie por sitio. El número necesario de réplicas depende del tamaño de las diferencias que se

consideran importantes y de la precisión que se desea alcanzar.

El número de réplicas necesarias para detectar los distintos grados de precisión en términos de un porcentaje del promedio se indican en el Cuadro 9-4 (Anón. 1963c). Por ejemplo, en un experimento cuya precisión esperada es del 10%, y en el que una diferencia del 12% es significativa, se necesitarían seis réplicas, que se podrían distribuir en seis bloques de ocho especies cada uno.

El nivel de precisión se puede estimar siempre y cuando se tenga una experiencia adecuada. Si ese no es el caso, quizás sería aconsejable confinar el trabajo inicial a ensayos pilotos diseñados para determinar la precisión en trabajos posteriores más formales.

La distribución al azar (aleatorización) de las parcelas de especies en cada experimento es esencial para obtener cálculos válidos del error experimental (Anón. 1963c). La distribución al azar debe ser estricta y no esporádica, o se deben usar otros dispositivos de mayor objetividad para determinar la ubicación. Las condiciones del suelo podrían afectar la disposición del experimento. Dentro de las parcelas distribuidas al azar, el diseño debería minimizar las variaciones de vegetación, suelo o uso anterior. Las parcelas deben agruparse en bloques, de modo que cada uno contenga un juego completo de comparaciones (o especies); estos grupos se llaman "bloques distribuidos al azar". Donde las variaciones del sitio presentan dos direcciones distintas (ladera y aspecto), lo indicado es usar el cuadrado latino con cada especie en cada hilera y columna, si el número de especies y tratamientos es igual. Si no es el caso, se recomienda el cuadrado latino incompleto o el diseño reticular. Sin embargo, la completa estandarización de los diseños experimentales no se considera ni necesaria ni deseable.

Durante la reunión de la Comisión Forestal de Latinoamérica en Trinidad en 1967, un sub-comité técnico solicitó que se coordinaran y estandarizaran las pruebas de especies en el neotrópico (Anón. 1968a). Las siguientes recomendaciones todavía son válidas. La meta de la selección es elegir especies que: 1) están bien adaptadas al sitio y permanezcan sanas durante la rotación programada, 2) produzcan tasas de crecimiento y rendimiento aceptables, 3) produzcan materia prima

apropiada para los objetivos definidos, con flexibilidad para adaptarse a las cambiantes demandas del mercado.

Los pasos administrativos en el desarrollo de un programa de ensayo de especies típicamente son los siguientes:

- Definir con claridad el objetivo de las investigaciones, y que el personal de investigación lo entienda bien.
- Preparar un plan escrito para la investigación.
- Revisar el plan para asegurarse de que: refleje con precisión el objetivo; especifique los recursos adecuados; programe las operaciones según su urgencia y recursos; proporcione datos y antecedentes adecuados para la selección de sitios y especies; proporcione datos adecuados para el diseño de las estadísticas; proporcione estándares meticulosos para las prácticas de cultivo, y permita la ejecución de experimentos adicionales sobre técnicas de cultivo.
- Obtener la aprobación oficial del plan y un compromiso de apoyo y respaldo.
- Informar de los avances regularmente, la función del plan original o a las modificaciones necesarias.

Cuadro 9-4.—Diferencias de significancia (expresadas como porcentaje del promedio) obtenidas en experimentos de precisión y número de réplicas dadas (%)

No. de réplicas	Precisión estimada del experimento (% promedio)				
	5	10	15	20	25
2	10 ^a	20	30	40	50
3	8	16	24	33	41
4	7	14	21	28	35
5	6	13	19	25	32
6	6	12	17	23	29
8	5	10	15	20	25
10	4	9	13	18	22
15	4	7	11	15	18
20	3	6	9	13	16
25	3	6	8	11	14

Fuente: Anón. 1963c.

Nota: Los números indican la diferencia porcentual de la significación.

del experimento; 2) flexible, o sea que es capaz de adaptarse a las irregularidades del sitio; 3) simple, o sea que puede ser efectuado por un personal de campo poco adiestrado. Se recomiendan bloques distribuidos completamente al azar, a menos que las circunstancias sean fuera de lo común.

El primer paso en el ensayo de especies es obtener información básica de los sitios donde serán plantadas, incluyendo clima (especialmente precipitación total y estacional), suelo (especialmente condiciones físicas), topografía, vegetación y uso o abuso previos. La escogencia siguiente de especies se basa en la extrapolación de datos de una localidad a otra.

La variación intraespecífica puede modificar los resultados de estas pruebas. No puede decirse que la muestra de una especie es representativa de la especie en general hasta establecer cuán extensa es la variación entre sus distintas poblaciones (Harper 1977).

Aún cuando se tenga todos los datos comparativos necesarios (lo que es muy raro), sería muy imprudente proceder de inmediato con una plantación a gran escala. Con parcelas experimentales más pequeñas se pueden obtener datos más precisos que con un bloque de 1000 ha, y además, a una fracción del costo. Existe un argumento sólido por continuar haciendo pruebas de especies adicionales que pueden resultar superiores o que al menos proporcionen la posibilidad de alternativas que mejoren la diversidad.

A medida que los ensayos de especies proporcionan mayores datos sobre sitios y especies, se puede progresar de la comprobación de muchas especies a unas pocas, y del uso de parcelas pequeñas a parcelas grandes. Las tres fases de la secuencia son: eliminación, prueba y comprobación (Anón. 1968a).

La fase de la eliminación abarca todas las posibles especies, a menudo de 20 a 40 en América tropical. El objetivo es reducir la cantidad de especies para ensayos más específicos. La supervivencia y las tasas iniciales de crecimiento constituyen los criterios principales. La cantidad de especies posibles seleccionadas depende de la calidad del sitio, del tamaño de la futura demanda del mercado, y de la disponibilidad de semillas, personal y fondos. Las pruebas consisten de parcelas pequeñas de 1 a 25 árboles. En las parcelas de un sólo árbol no se da un aislamiento entre especies, lo que permite

economizar en términos de área, pero que puede afectar a especies que no son precoces si se ubican al lado de otras que sí lo son. En una parcela de 25 árboles, si sólo se miden los 9 árboles centrales (3 m x 3 m), se puede eliminar la interferencia externa.

Las limitaciones de terrenos y fondos a que está sujeta la investigación forestal ha conducido a que usen parcelas de un sólo árbol (Shiue y Pauley 1961). En Puerto Rico se ha usado un diseño reticular con 16 hileras de un árbol de cada especie por hilera, replicado en cada sitio. La mortalidad en estos experimentos constituye una pérdida de parcelas, lo que hace que el análisis sea más complicado que en las parcelas con más árboles, donde el efecto de la mortalidad es sólo parcial (Wollons 1980).

En la fase de prueba sólo se usan las especies prometedoras. El objetivo es relacionar el desempeño de la especie con las diferencias de sitio. Parcelas de 25 a 144 árboles varían de tamaño de 0,02 a 0,10 ha. Una parcela generalmente recomendada contiene 121 árboles (11 x 11) con una franja de aislamiento de 2 hileras, lo que deja 49 árboles (7 x 7) útiles. Hasta el momento del primer raleo se mide el crecimiento en diámetro y altura y el área basal.

En la fase de comprobación el objetivo es confirmar (para condiciones normales de plantación) los resultados obtenidos con las especies superiores, por lo general entre una y tres. Lo que se intenta es determinar cuál es el mejor manejo para la producción de madera. El tamaño de la parcela dependerá de la gama de tratamientos de raleo a ser evaluados y puede variar de 0,4 a 5,0 ha, con franjas de aislamiento de hasta cinco hileras.

Para las pruebas de eliminación en parcelas de un sólo árbol, se debe ubicar sólo una parcela en cada zona climática (no edáfica). En cada sitio deben haber 12 réplicas (árboles) por especie. Cada réplica puede ser una hilera única de árboles con un ejemplar de cada especie. Con parcelas de 25 árboles, la única diferencia es que la cantidad de réplicas dentro de cada zona no es más de cuatro.

En la fase de prueba, los distintos sitios o tipos ubicados en cada zona de vida se comparan con dos o más grupos de parcelas. Para cada ubicación se recomienda establecer al menos tres parcelas de réplicas. Para la

fase de comprobación final, después de las comparaciones de ubicaciones, y ya que se han usado parcelas grandes, por lo general no se deben hacer otras réplicas geográficas.

Las prácticas de medición de los árboles varían con la naturaleza de la prueba. En parcelas de eliminación de un árbol, se mide la altura a los seis meses, al final del primer año, y anualmente hasta que el dap promedio alcance 5 cm; en ese momento comienzan las mediciones anuales del dap. En parcelas de 25 árboles sólo se miden las alturas de dos de los árboles dominantes de la parcela interior de 3 x 3 antes de que alcancen un dap promedio de 5 cm; a partir de allí, se miden anualmente las alturas de estos dos árboles y los diámetros de los nueve árboles.

Las mediciones en la fase de comprobación (parcelas de 121 árboles) se confinan a las 7 x 7 hileras interiores. Las alturas de los 250 árboles más altos por hectárea (8 por parcela) se miden anualmente hasta los cinco años. Los diámetros de todos los árboles se miden anualmente después de alcanzar un promedio de 5 cm. Un esquema similar también es adecuado para efectuar pruebas de comprobación, siempre que se hagan disposiciones para la numeración permanente de los árboles, la medición antes y después del raleo y la tala y medición completa de los árboles de muestra para la determinación de volúmenes.

La utilidad de estos estudios disminuye una vez obtenido su propósito principal. Las pruebas de eliminación pueden servir su propósito en un plazo de tres a cinco años; las pruebas de ensayo durante cinco a diez años; y las pruebas de comprobación, al final de la rotación práctica. Las medidas que se toman después de estas edades podrían tener algún valor, pero no para los objetivos originales de la prueba.

La guía de la FAO (Anón. 1968a) agrega otro punto a la discusión del uso de especies estándares para efectos de comparación. La mayoría de los ensayos de especies se hacen para encontrar nuevas especies superiores a las que ya se conocen; por eso es necesario incluir las especies que ya se consideran mejores en la prueba de cada nueva especie.

Inevitablemente, las pruebas de especies toman mucho tiempo. Quizás, es necesario repetir las pruebas para comparar estaciones y clima, particularmente donde hay una época seca marcada. No se puede establecer con

certeza absoluta la adaptabilidad de una especie hasta después de una o más rotaciones. Aún más tarde, suelen aparecer problemas relativos a insectos o enfermedades.

Las experiencias en Australia han demostrado lo necesario que es apegarse estrictamente a los requisitos estadísticos de replicamiento y distribución al azar, y de establecimiento y mantenimiento de las parcelas (Wollons 1980). Sin réplicas, no es posible comprobar las hipótesis ni obtener estimados precisos. Los tratamientos donde no han habido réplicas siempre muestran una predisposición hacia un resultado único que puede conducir a que se tomen decisiones de manejo erróneas. Si las réplicas son pocas y las variaciones de los fenotipos arbóreos son grandes, el valor de los experimentos puede ser limitado. Donde no existen antecedentes disponibles, un posible enfoque es establecer una serie de parcelas uniformes por un período de 2 a 5 años, para comparar las variaciones entre especies en un sitio. Estos datos se pueden usar más tarde para predecir variaciones posteriores.

En los trópicos, muchos tratamientos se ven seriamente afectados por la estación y el sitio, lo que significa que las reacciones generales sólo se pueden evaluar con una serie de pruebas (Wollons 1980). Las comparaciones entre bloques, donde las variaciones entre bloques pueden mantenerse a un mínimo, dan una mayor sensibilidad a las variaciones que la obtenida con una distribución al azar. También se enfatiza la necesidad de mantener la parcela bien cuidada a través de la rotación entera (Wollons 1980). Los problemas que no se pueden anticipar se relacionan con enfermedades y ataques de insectos, pastoreo, incendios, daños causados por la fauna, competencia de las malezas y errores de manejo. Debido a estos problemas, es prudente buscar desde el principio indicadores de predicción del futuro desempeño. Por ejemplo, para ciertos pinos mexicanos, el crecimiento en altura al primer año puede estar fuertemente correlacionado a la altura en el quinto año (Barrett 1970). Tales índices son importantes para quienes no quieren esperar hasta el resultado final de las pruebas de especies.

Cuando una especie ha sido seleccionada tentativamente, se necesitan mayores investigaciones para desarrollar las mejores técnicas para su establecimiento. Esto se puede hacer mediante una serie de estudios de corto plazo. En África oriental, se ha usado un espaciamiento uniforme de 1 m x 1 m y hasta 100 árboles por tratamiento (Stuart 1955). Plantones de vivero de buena calidad se plantan en suelos bien

preparados y fertilizados (Griffith y Howland 1962). Las raíces se podan vertical y horizontalmente cada dos semanas. La plantación se establece al inicio de la estación húmeda, a una profundidad algo mayor que la del vivero. Se evita exponer las raíces y la limpieza de malezas es intensiva, eliminando todas las hierbas de raíces profundas.

Un manual completo de investigación de especies y procedencias tropicales (Burley y Wood 1976, 1977) se halla disponible como guía general para gran parte de los trabajos. Este manual recomienda efectuar pruebas de procedencias junto con las pruebas de especies, debido a variaciones intraespecíficas que podrían ser significativas en comparación con otras especies. El manual enfatiza la necesidad de estudiar a fondo los siguientes temas: población base, variación genética, evaluación del sitio (tanto de las fuentes de semillas como de los sitios de pruebas), diseño experimental, prácticas de propagación y evaluación de resultados.

Propagación de árboles y regeneración artificial

Se necesitan muchas investigaciones sobre la propagación de árboles y sobre la regeneración artificial; muchos problemas son universales, pero distintas soluciones podrían ser mejores en distintos sitios. Un primer paso lógico (pero generalmente subestimado) es hacer una revisión completa del desempeño de cualquier plantación existente, bajo condiciones similares a las de la regeneración propuesta (Hinds 1952).

Con una extensa variedad de problemas que necesitan estudio, es esencial dar prioridad a la región y programar los estudios en secuencia, comenzando con el más urgente. Las instituciones de investigación pública pueden guiarse mediante el proceso de análisis del problema, en que se evalúan todos los factores que contribuyen a la importancia relativa de los distintos problemas y de los beneficios relativos que su solución es capaz de engendrar.

La complejidad de la investigación que la forestería tropical requiere no se debe subestimar. Esto lo ilustran los casi 40 años de investigación sobre la adaptabilidad de *Cedrela odorata* en Trinidad (Beard 1942). *C. odorata* es abundante en los bosques semiperennes de Trinidad. La investigación de su regeneración comenzó en 1905. Se intentó establecer a la especie mediante especímenes de plantas silvestres y siembra directa de semillas, pero se abandonó después de pérdidas frecuentes debido a

los incendios. Luego, la especie se plantó con cultivos alimenticios y en los claros creados por el sistema de dosel protector. En 1923, estos intentos también se consideraron fracasados; si bien la especie tuvo un buen comienzo, se presentaron problemas con insectos y enfermedades. En 1924, se hicieron pruebas con distintas intensidades de luz, abono y mezclas de especies, pero de nuevo se fracasó. El trasplantado durante la estación seca, cuando los árboles no tienen hojas, dio buenos resultados inicialmente, pero luego todos los árboles murieron. En 1929, se descontinuó la limpieza completa del terreno porque se pensó que *C. odorata* necesitaba un abrigo vegetal; los resultados fueron desalentadores. En 1933, se llegó a la conclusión de que *C. odorata* crecía vigorosamente en bosques perennes durante 18 meses y en bosques semi-perennes durante tres años. Las investigaciones del suelo no fueron concluyentes; la adición de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) no mostró un mejor crecimiento de *C. odorata* con fertilizantes que con agua común y corriente. Se pensó que el problema principal era la humedad del suelo, porque los árboles con frecuencia perdían sus hojas durante la estación lluviosa. En 1945, se llegó a la conclusión de que el establecimiento exitoso de *C. odorata* quizás requiera años más de investigación por parte de los fisiólogos de plantas y químicos del suelo; sin embargo, la especie es tan valiosa que cualquier éxito resarciría todos los esfuerzos (Cater 1945). Por lo tanto, los problemas de producción de *C. odorata*, una especie americana que tiene mucho éxito en algunas partes del África, todavía permanecen sin resolver en gran parte del neotrópico.

Uso de fertilizantes

El uso de fertilizantes en viveros y plantaciones generalmente se ha considerado deseable (Qureshi y Yadar 1967). En muchas zonas, sin embargo, la aplicación de fertilizantes ha sobrepasado toda base científica para su uso. Con frecuencia se ignora el análisis previo de la fertilidad del suelo. Las pruebas agrícolas estándar del suelo pueden ser de cierta utilidad, pero no están orientadas a las preocupaciones importantes de la forestería, como período de crecimiento, profundidad de las raíces y requisitos fisiológicos. Los ensayos con fertilizantes (Qureshi y Yadar 1967) que se necesitan generalmente incluyen: 1) dosis de NPK, solos o en combinación; 2) comparación entre fertilizantes inorgánicos y abono orgánico; 3) momento oportuno de aplicación y edad del cultivo en que las aplicaciones de fertilizante deben cesar; 4) frecuencia y método de la aplicación.

Los estudios con *Pinus elliottii* en el sur de EE.UU. demuestran lo complejas que son las investigaciones de fertilización (Mead y Pritchett 1971). Estudios en seis suelos demostraron una correlación débil entre el comportamiento de la especie en el campo y en las parcelas. Ninguna medida de la respuesta de las plántulas a los tratamientos (altura, diámetro o peso seco) se correlacionó de manera consistente con el promedio de altura del árbol en el campo. La correlación entre las alturas de árboles experimentales en envases a las de árboles en el campo eran pobres después de tres años y sólo un poco mejores después de siete años. Así que, aunque los experimentos de invernadero son útiles para estudiar los síntomas de las deficiencias y para determinar las limitaciones de nutrimentos, los resultados que pronostican la reacción a los fertilizantes en el campo se deben usar con cautela.

Las investigaciones futuras con fertilizantes deberían involucrar estudios de micorrizas debido al efecto de estas en la asimilación de nutrimentos. El deterioro de las micorrizas en plantaciones de segunda rotación de *P. patula* en Suazilandia (Robinson 1973) sugiere lo importantes que son estos organismos.

Espacio de crecimiento

Gran parte de la silvicultura está dedicada a proporcionar un espacio de crecimiento adecuado para los árboles individuales. Las técnicas experimentales que estudian las reacciones al espaciamiento se han comprobado extensamente en los trópicos, aunque es común ver un diseño experimental pobre. Los estudios de rodales naturales requieren objetivos claros desde el inicio y un número fijo de árboles vivos medidos en una amplia gama de espaciamientos (Smith 1959). En plantaciones, el uso de un número constante de árboles para cada espaciamiento es más eficaz que una parcela de superficie uniforme con un número variable de árboles. Debe haber un número igual de árboles residuales después del raleo final de cada tratamiento. Un número final común ha sido 49 (7 x 7), con una franja de amortiguamiento de dos hileras (Smith 1959).

Vuokila (1965) señala algunas complicaciones de la investigación sobre raleos. Se necesitan parcelas permanentes, incluyendo algunas extras, para determinar las reacciones a los raleos. La precisión de los estudios a largo plazo sufre cuando hay cambios frecuentes de personal. Los procedimientos de campo o de cálculo cambian antes de terminar los estudios. Los cálculos sucesivos de volumen durante períodos cortos a veces

están sujetos a un margen de error demasiado grande como para medir el crecimiento con exactitud. Los tratamientos que mejor ilustran las reacciones biológicas pueden no ser prácticos para una aplicación más extensa. Distintos intervalos de raleos requieren que se comparen los crecimientos de distintos períodos en relación al tiempo y al clima. Las parcelas replicadas aumentan los costos en buena medida.

Dos desarrollos ingeniosos en cuanto a técnicas de investigación del raleo son los métodos de tendencia de curva correlacionada de O'Conner (1935) y el diseño de tratamientos de parcelas clinales de Pudden (Borota y Procter 1967, Dawkins 1960, Vuokila 1965). El método de O'Conner se basa en el concepto de que las tasas de crecimiento de distintos árboles, ubicados en una gama de espaciamientos, pueden relacionarse desde antes que la competencia empiece a afectarlos; así, a medida que la competencia comienza a restringir el crecimiento de los árboles en los espaciamientos más cortos, ese grado de restricción se puede determinar comparando el desarrollo de ese árbol con los árboles en espaciamientos no limitados. Tales estudios de espaciamiento hacen posible el desarrollo de regresiones para: 1) predecir las tasas de crecimiento medio de los árboles de cualquier tamaño ubicados en cualquier espaciamiento, 2) definir los espaciamientos necesarios para alcanzar el tamaño maduro en un tiempo dado con base en el tamaño actual del árbol.

En el diseño de parcelas clinales de Pudden se usan dos métodos: parcelas estrechas rectangulares o círculos concéntricos, en una secuencia de espaciamientos con diferencias tan pequeñas entre tratamientos adyacentes que no se necesitan franjas de aislamiento (Dawkins 1960). Una sola hilera de árboles se planta alrededor de la parte exterior de la parcela. Esta técnica se ha criticado con razón porque no está distribuida al azar, pero si se la replica, el diseño de la parcela todavía es una fuente confiable de datos preliminares sobre los espaciamientos óptimos de los distintos tamaños de árboles. La disposición rectangular de Pudden también se puede usar para el raleo, con tratamientos progresivamente más intensos adyacentes unos a otros. El raleo más intenso, según el cual deben quedar de 5 a 10 árboles por parcela, dicta el tamaño mínimo de parcela (Dawkins 1960).

La Fig. 9-4 ilustra la disposición de un estudio de raleo clinal (Borota y Procter 1967). La programación del raleo se puede establecer según el Cuadro 9-5.

Briscoe (1990), en un excelente manual de investigación de campo, ilustra el diseño de estudio de espaciamiento circular de Nelder (1962), según se muestra en la Fig. 9-5. Según su descripción, los árboles se disponen en forma circular, estableciendo un ángulo fijo entre los rayos y cada árbol en la circunferencia, las distancias entre los árboles aumentan con la distancia desde el eje.

La experiencia en Surinam llevó a que se efectuaran raleos sistemáticos y se establecieran parcelas de rendimiento en las plantaciones (Voorhoeve y Schulz 1968). Estas dos prácticas proporcionan promedios e incrementos medios anuales periódicos de diámetro, altura y volumen; diferencian entre clases de sitio y dan información de volumen y rendimiento y prescripciones para el raleo. Los datos se generan en parcelas de 10 m x 10 m, aisladas mediante una franja de 10 m de ancho u ocho hileras de árboles. El espaciamiento se expresa en términos del índice de espaciamiento (S%) ya descrito.

Pruebas en lo que hoy es Malasia con *Ochroma lagopus* con un espaciamiento ancho (4,3 m x 4,3 m) demuestra que una sola hilera límite es suficiente para aislar la plantación (Wycherley y Mitchell 1962).

La poda es menos frecuente que el raleo en los trópicos, aunque puede ser muy importante en las plantaciones de especies coníferas. Con muchas angiospermas, la poda puede efectuarse meramente mediante el control del espaciamiento. Sin embargo, se sabe demasiado poco sobre los efectos, beneficios y resultados económicos de la poda. Se necesitan más investigaciones para determinar si las distintas especies deben ser podadas, su reacción a la poda, el efecto de la poda en la forma del árbol, el momento oportuno para la primera poda, la mejor estación de poda, la velocidad de sanar, los problemas con insectos y pudrición y los efectos de la poda sobre el crecimiento y la ramificación epicórmica (Laurie 1941e).

Mejoramiento de los árboles

En general, la extracción de madera en los bosques tropicales húmedos es muy selectiva, ya que sólo se extraen los mejores árboles. Aunque la calidad de los árboles en los ecosistemas naturales es mucho más un reflejo del ambiente que de la herencia, el ambiente puede deteriorar la calidad genética de las cosechas posteriores de semillas, un efecto "disgénico". Por consiguiente, la mejora genética de los árboles es

importante, aunque sólo fuera por contrarrestar ese deterioro (Jasso 1970).

Las recomendaciones generales de las investigaciones para el mejoramiento de los árboles tropicales y para contrarrestar el impacto negativo de los tratamientos forestales incluyen las siguientes (Jasso 1970):

- Explorar y evaluar los géneros y las especies de importancia económica mundial.
- Evaluar la variabilidad de especies que no se explotan y que pueden tener importancia económica.
- Aumentar la investigación sobre la propagación vegetativa, con énfasis en las especies amenazadas por la extinción de sus genotipos.
- Establecer un banco genético forestal en países de donde son nativas las especies importantes, para preservar los árboles de cualidades superiores.

Un objetivo principal de las investigaciones para el mejoramiento de los árboles en los países tropicales debe ser la conservación de germoplasma, tanto en las poblaciones naturales como en los bancos genéticos (Brune y Melchior 1976). Para esto, la conservación de los recursos genéticos debe convertirse en una parte integral de la planificación del manejo y de la práctica forestal (Roche 1975). La conservación "in situ" es ideal, ya que su protección se extiende a todos los distintos ecosistemas tropicales. Se deben usar fuentes de genes conservados, tanto para las investigaciones como para la demostración de sus valores.

Debido a la gran extensión de las zonas en el trópico capaces de rendir una producción forestal, aún pequeñas mejoras genéticas pueden aumentar significativamente los beneficios sociales, el valor de la tierra y la producción de materia prima (Fig. 9-6).

Una característica clave del mejoramiento es la naturaleza repetida y acumulativa de las mejoras (Namkoong *et al.* 1980). Se pueden lograr ganancias repetidas a través de múltiples generaciones, que aumentan los rendimientos más allá del máximo alcanzado por la población actual. Los valores han logrado durante la primera generación de la selección ganancias de hasta 30%.

El mejoramiento genético de árboles forestales comienza con el estudio de la apariencia externa de cada individuo (su fenotipo), con el propósito de realzar su

	AMORTIGUAMIENTO	10	680			11	35	AMORTIGUAMIENTO
PARCELAS DE CONTROL PARA VARIACIÓN DEL SITIO		9	560			12	50	
		8	400			13	70	
	ÁREA CIRCUNDANTE	7	280	ÁREA CIRCUNDANTE	ÁREA CIRCUNDANTE	14	100	ÁREA CIRCUNDANTE
		6	200			15	140	
		5	140			16	200	
		4	100			17	280	
		3	70			18	400	
		2	50			19	560	
	AMORTIGUAMIENTO	1	35			20	680	AMORTIGUAMIENTO
								PARCELAS DE CONTROL PARA VARIACIÓN DEL SITIO

Fig. 9-4.—Diagrama de raleo clinal (Borota y Proctor 1967)

Cuadro 9-5.—Programa de raleos prescritos para el diseño mostrado en la Fig. 9-4 (años).

Densidad final (árboles/ha)	Fustes por ha									
	1,380	990	690	490	345	245	170	125	85	
1,680	Sin raleo									
1,380	3 ^a									
990		3								
690		3	4							
490		3	4	5						
345		3	4	5	6					
245		3	4	5	6	7				
170		3	4	5	6	7	8			
125		3	4	5	6	7	8	9		
85		3	4	5	6	7	8	9	10	

Fuente: Borota y Proctor 1967.

^aLas cifras indican la edad del raleo en años.

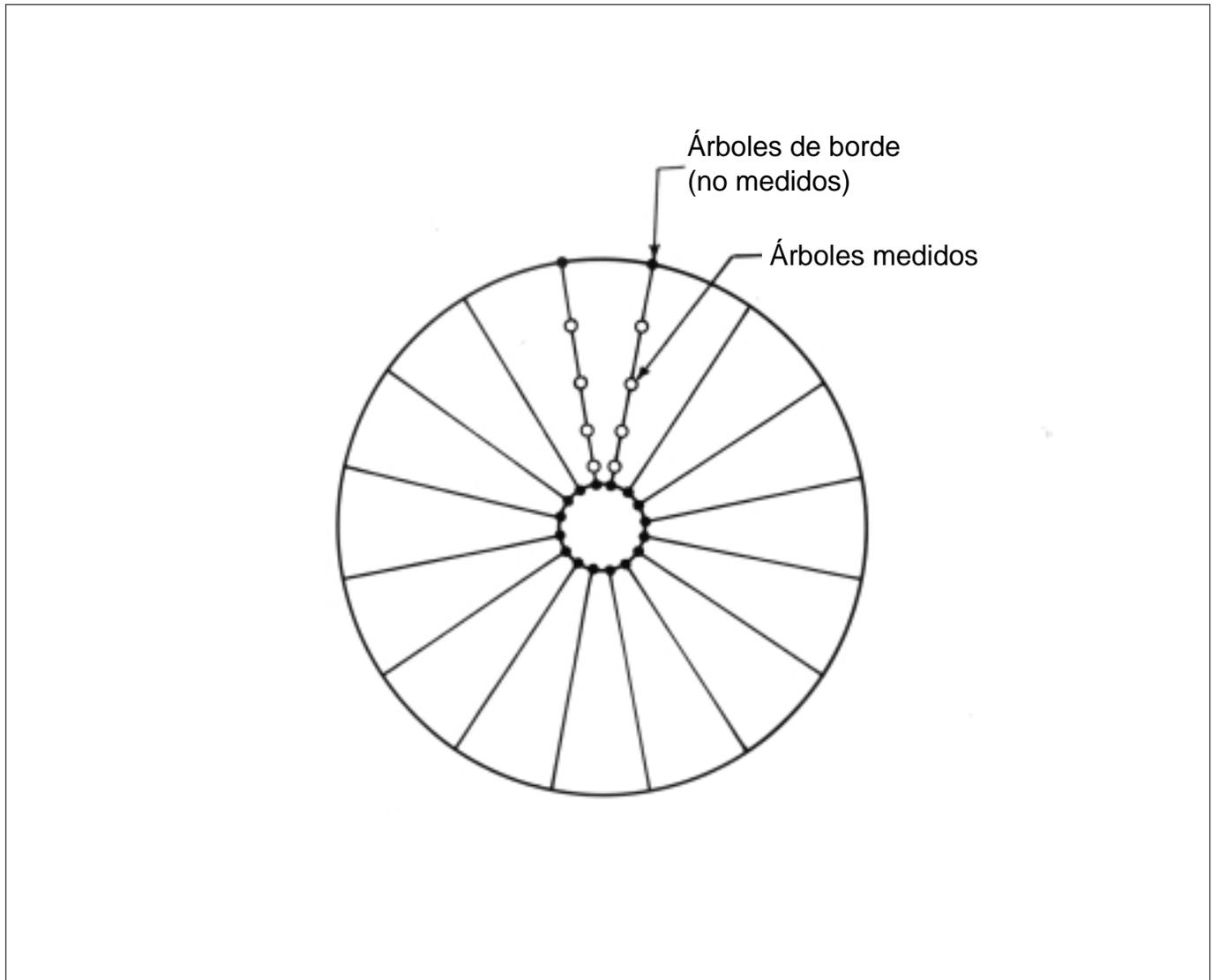


Fig. 9-5.—El diseño Nelder (1962) para estudios de espaciamiento (Briscoe 1990).

aparición mediante la manipulación de las cualidades inherentes o del genotipo del árbol. Debido a la larga vida de los árboles y la cosecha repetida de semillas, o a su capacidad de rebrote, las oportunidades para multiplicar las características deseables son aún mayores que para las plantas de vida corta. Además, es barato mantener las mejoras genéticas en los árboles una vez que se han logrado (Larsen 1956).

La variación natural demostrada por la mayoría de las especies tropicales, a lo largo de su distribución geográfica, indica que la variación genética se puede liberar mediante la manipulación (Namkoong *et al.* 1980). Los problemas yacen en la capacidad limitada de

observar la variación, la dificultad en reconocer las combinaciones de genes de utilidad potencial para el cambio y el riesgo de que se pierda la variación si por alguna razón se destruye el bosque.

La mejora genética esperada depende del “diferencial de selección”, o sea, la diferencia entre la media de un rasgo en un individuo seleccionado y la media en toda la población. Si se escoge más de un rasgo, el diferencial se reduce enormemente por cada rasgo que se añade (Shelbourne 1973).

Idealmente, el mejoramiento de los árboles se debe limitar a especies que se han evaluado durante una

rotación entera, al menos en parcelas de ensayo con no menos de 100 ha en bosques de buenas procedencias (Shelbourne 1973). Cuando sea posible, el índice de selección debería combinar datos sobre la importancia económica de cada rasgo y las perspectivas esperadas para el cambio de cada rasgo mediante la selección genética. Por lo general, se debe efectuar de entrada una determinación con base en una conjetura probable.

La variación entre procedencias de *P. taeda* y *P. elliottii* da raíz a especímenes adaptables o no adaptables (Burley 1966). Algunas de estas variaciones se obtienen al azar, pero la mayoría son clinales, relacionadas con la latitud y longitud. Sin embargo, es posible que las conclusiones con base en las observaciones iniciales se contradigan más tarde; por lo que el proceso debe ser de largo plazo.

Por sí sólo, obtener un rendimiento máximo no es un objetivo apropiado para el mejoramiento de los árboles. La calidad de la madera, junto con la forma y tendencia a la ramificación, si se consideran criterios de selección (Hughes 1973). La selección de las especies debe relacionarse con su desempeño en sitios específicos. En suelos marginales para la producción agrícola, sólo pueden tener éxito los árboles de alta productividad. En otros sitios, la tolerancia a la pobreza del suelo es importante. Se deben desarrollar genotipos cuya productividad sea aceptable con un uso mínimo de fertilizantes y que sin embargo no deterioren el suelo (Bevege 1976). Una base genética amplia también se debe mantener para los propósitos de una selección continua.

Los aumentos en los costos del petróleo han sugerido que las investigaciones genéticas se deben orientar hacia agroecosistemas extensos, de bajos insumos y usos múltiples, para sustituir a la agricultura intensiva que requiere gran cantidad de insumos (Duke 1981). Para esto se necesitan bancos de genes bien adaptados a ambientes marginales. La meta de tales empeños no sería la obtención de rendimientos de un sólo producto, como en el caso de los monocultivos, sino rendimientos múltiples en agroecosistemas multiestratificados y de cultivos intercalados. Las prácticas futuras deben incluir el uso del germoplasma tolerante, cultivos intercalados, reciclaje de residuos, control biológico de plagas y la utilización completa de la producción (Duke 1981).

El costo es crítico en las investigaciones para el mejoramiento de los árboles. A pesar que se prometen



Fig. 9-6.—El crecimiento excepcional de *Gmelina arborea* a los cuatro años en Jari, Brasil, es un ejemplo de las futuras fuentes de mejoramiento genético de los árboles tropicales por medio de las investigaciones modernas.

rendimientos altos y de buena calidad, las investigaciones necesarias requieren la dedicación de científicos altamente especializados y de experimentación a largo plazo. Hay que hacer grandes esfuerzos para mantener los gastos moderados y obtener resultados rápidamente. A continuación se presentan varias posibles maneras de ahorrar (Carlisle y Teich 1975):

- Determinar el nivel mínimo de muestreo que represente la variación genética natural.
- Determinar el período mínimo durante el cual las pruebas deben estar expuestas a variaciones climáticas.
- Sopesar racionalmente el rendimiento y la calidad de la madera.
- Predecir el desempeño de los árboles como adultos a partir de observaciones iniciales.

- Explotar el potencial completo de la propagación vegetativa.

En los trópicos, no se dispone de la mayor parte de información fundamental sobre diferenciales, por lo que se debe suponer a partir de la experiencia en la zona templada con especies similares. Sin embargo, los científicos deben continuar con el mejoramiento de muchas especies tropicales importantes. Una compilación efectuada por un panel de expertos en recursos genéticos forestales de la FAO señala que, para el neotrópico, 43 especies de árboles merecen investigación para su mejoramiento, 14 de las cuales requieren trabajos urgentes (Kemp 1974).

No se puede esperar que la investigación sobre mejoramiento de árboles tropicales prospere en forma individual o regional; se debe tratar de aunar esfuerzos, preferiblemente con base en la cooperación internacional. La mayoría de las especies tropicales ocurren naturalmente y su potencial es significativo en más de un país. Muy pocos países tienen los recursos necesarios para apoyar la investigación altamente especializada que se necesita en mejoramiento genético. Los esfuerzos conjuntos a nivel internacional pueden brindar (Burley y Kemp 1973):

- Información sobre la distribución, variación fenotípica y genotípica en toda la distribución natural de cada especie tropical.
- Suficientes semillas para que todos los países interesados establezcan pruebas de procedencias, adecuadamente diseñadas y replicadas.
- Bancos de genes representativos para la preservación.
- Huertos regionales de mejoramiento.

A pesar de lo necesarios que son los empeños regionales, las evaluaciones del desempeño final constituyen estrictamente una responsabilidad local. Un ensayo de seis procedencias de teca en la India demostró, después de 16 años, que las semillas de la región generalmente producían buenos resultados, pero no eran necesariamente las mejores. Por lo tanto, se tuvo que ensayar cada procedencia en cada sitio (Mathauda 1954a). Las semillas provenientes de sitios húmedos resultaron ser superiores a las semillas de sitios secos.

El impacto del sitio en el desempeño del árbol se ve en las pruebas de *P. caribaea hondurensis* de la misma

procedencia pero cultivada en siete países distintos (Palmer y Tabb 1973). La variación en las características de la pulpa era tan grande que la calidad se podía pronosticar sólo con base en los muestreos de sitio.

El desarrollo de un programa genético para bosques tropicales típicamente comienza con una evaluación de las variaciones genéticas de las especies de árboles comerciales más importantes (Stern y Roche 1974). En los países que no poseen especies comerciales, se puede introducir y ensayar con especies exóticas bajo una variedad de condiciones. A medida que los árboles maduran, se comienza la selección de un árbol de características deseables, y se produce la progenie sembrando las semillas o mediante la reproducción vegetativa. Sin embargo, antes de hacer una selección entre las poblaciones exóticas es muy ventajoso saber como se comportan los rodales al llegar a la edad de la rotación (Goddard 1973). Luego se produce a mayor escala un material de prueba de calidad superior. Se logran objetivos a corto plazo mediante huertos semilleros. Para objetivos de más largo plazo, se necesitan huertos de investigación para conservar una amplia base genética de los genotipos que eventualmente resulten útiles. La fase siguiente es un programa de reproducción que requiere un conocimiento de la biología reproductiva de la especie, basado en observaciones fenológicas (Bawa 1976).

En las primeras etapas del mejoramiento de los árboles, es deseable plantar bloques de casi 2 ha para cada especie o procedencia, como fuente inicial de semillas (Shelbourne 1973). Una vez que se dispone de árboles semilleros de buena procedencia, se recogen las mejores semillas de los mejores individuos en la plantación, o en un área más pequeña de calidad excepcional, raleada hasta un décimo de la densidad original y manejada como zona de producción de semillas.

En un análisis del estado de las investigaciones genéticas con pinos tropicales, Burley (1976) estableció una secuencia ordenada de investigación. El primer paso es estudiar las variaciones en el rango de distribución natural y evaluar las procedencias en ambientes exóticos y nativos. Esta fase, para los pinos tropicales como para muchas otras especies, requiere una cooperación y coordinación a nivel internacional. El siguiente paso es determinar la naturaleza de los sistemas de reproducción de cada especie. Luego, se deben recoger mayores datos sobre la distribución de genes y la estructura de la población, generalmente mediante estudios de

dispersión del polen y de las semillas, y de distribución geográfica de los genotipos. Los métodos para la evaluación de grupos de genes incluyen comparaciones de procedencias y progenies, análisis de las propiedades químicas y de las interacciones entre los genotipos y el ambiente.

Las pruebas de procedencias pasan por las mismas fases que los ensayos de especies (Burley 1969). La primera fase de eliminación suele involucrar 50 o más procedencias; es una comparación simple que se completa a una edad que varía de un cuarto a la mitad del plazo de rotación. Se pueden usar parcelas cuadradas de 1 a 25 árboles. Los criterios principales son la supervivencia y el crecimiento en altura. En la segunda fase, que involucra de 5 a 10 procedencias, se usan parcelas de 49 a 169 árboles con una franja de aislamiento de 1 a 2 hileras. La fase de comprobación involucra parcelas replicadas de 0,5 a 1,0 ha en los sitios principales de cada país. En todas las etapas, el diseño más favorecido es el de bloques completos al azar, con una parcela por procedencia y por réplica. La evaluación se puede hacer a los seis meses, al año durante los primeros tres años y en adelante, a intervalos de 3 a 5 años. Se registran los datos de supervivencia, altura, dap, ancho y profundidad de copa, cantidad y ángulo de las ramas, uniformidad, rectitud del fuste y grosor de la corteza.

Una contribución principal en el mejoramiento de árboles tropicales es el "Manual de Investigación de Especies y Procedencias" compilado por Burley y Wood (1976), a partir de las contribuciones de muchos científicos. La descripción que sigue es una adaptación de esa fuente.

Tres tipos de variaciones naturales resultan en diferencias entre individuos de la misma especie. Una es genética y heredable, como la cantidad de los estambres; otra es ambientalmente inducida, como las variaciones locales en el tamaño de las hojas. La tercera tiene que ver con el desarrollo y se la ilustra mediante las diferencias entre las hojas de los árboles juveniles y maduros.

Las semillas se recogen frecuentemente para mejorar las poblaciones o comparar las procedencias. Una selección cuidadosa de fenotipos escogidos puede beneficiar el mejoramiento de las poblaciones. Para muestras representativas de procedencias, sin embargo, una selección intensiva no es apropiada. Asimismo, las

colecciones para conservar los genes extensamente representados deben provenir de una gran cantidad de árboles.

La selección de rodales para pruebas de procedencias requiere al menos cinco o seis sitios de colección, de manera que haya una buena representatividad de los límites y del centro de la distribución geográfica. Después de determinar la ubicación aproximada de los sitios de colección, se deben elegir rodales específicos lo suficientemente representativos y grandes como para proporcionar buenas muestras. Dentro de cada uno, las colecciones se deben hacer de no menos de 25 árboles. La toma de muestras de varios árboles adicionales es sólo un pequeño costo adicional a los costos de selección de los sitios, acceso y demás. La selección de los árboles también se puede efectuar al azar; sin embargo, no es aconsejable pues no excluye a los árboles enfermos o deformados. Con especies extensamente diseminadas, quizás sea posible efectuar colecciones de la mayoría de los árboles y aún así tener una pequeña cantidad de muestras. En lo posible, se debería recoger de cada árbol la misma cantidad de semillas. Es esencial estar absolutamente seguro del origen de las semillas; por eso, cada lote se debe rotular, indicando el sitio y deseablemente el número del árbol.

En el diseño de experimentos para comparar procedencias, se deben reconocer cinco posibles fuentes de variación:

1. Diferencias genéticas controladas entre las poblaciones que se comparan.
2. Diferencias ambientales controladas dentro de un sitio o entre dos o más sitios experimentales.
3. Variación genética no controlada entre plantas experimentales y entre esas y las poblaciones que representan.
4. Variaciones ambientales no controladas de parcela en parcela o de árbol a árbol, como resultado de las diferencias de suelo, microclima, aspecto, etc., incluyendo algunas diferencias que no se pueden precisar.
5. Error experimental resultante de variaciones aleatorias entre plantas, errores de ubicación de la procedencia en las parcelas e inexactitudes en la evaluación y registro de los datos.

Algunas ventajas y desventajas de los diseños de pruebas de procedencias se resumen en el Cuadro 9-6 (Wright y Andrew 1976).

Si los árboles escogidos para recolectar semillas son demasiado jóvenes, sus características actuales podrían no ser representativas de su calidad y desempeño futuro. En el caso de los pinos del sur de EE.UU., los árboles que alcanzaron una altura y diámetro superior a la edad de 30 años, no se podían identificar con mucha certeza antes de cumplir 20 años y menos aún antes de los 15 años (Wakeley 1971).

Agroforestería

Igbozurique (1971) se manifiesta totalmente a favor de los cultivos mixtos y sus beneficios sociales y físicos en los trópicos: *“El rendimiento no es el único índice de eficacia agrícola, pero no cabe duda que un sistema que produce muy buenos resultados sin el equipo tecnológico estupendo de la agricultura angloamericana, sin los aportes de la vasta mano de obra oriental, y sin la sociología soviética, merece un estudio intensivo. Este llamado es para que se hagan investigaciones ilimitadas con cultivos mixtos”*. Hace falta más investigación sobre las interacciones sinérgicas y antagónicas entre las especies en cultivos mixtos y sus rendimientos sostenibles (Duke 1981).

Un estimado efectuado por Bene *et al.* (1976) señala que más de la mitad de las tierras tropicales, aunque demasiado secas, demasiado quebradas o demasiado rocosas para ser consideradas como arables, son apropiadas para la aplicación de un sistema agroforestal. Aunque existen pocos datos comprobados para apoyar esta aseveración, este es un campo prometedor en el cual se deberían efectuar mayores investigaciones (Alvim 1981).

La investigación en agroforestería requiere un enfoque integrado y de carácter mucho más complejo que la experimentación tradicional (Alvim 1981). Las interacciones entre las distintas especies son generalmente específicas al sitio, por lo que es difícil hacer generalizaciones a partir de conclusiones que provienen de estudios aislados.

Se necesita un mejor equilibrio entre las investigaciones en plantaciones forestales, por un lado y las de cultivos agrícolas, por el otro (Pelzer 1958). La mayoría de los empeños hasta ahora tienen que ver con la intensificación de la práctica en plantaciones. Los

cultivos en colinas han recibido poca atención científica. Si el sistema agroforestal ha de progresar, se necesita una mayor colaboración en materia de investigación entre los forestales y los agrónomos.

Debido a que comúnmente se espera que el sistema agroforestal reemplace (o mitigue) los problemas de la agricultura migratoria en los trópicos, Kellogg (1963) sugirió que las investigaciones deberían comenzar con estudios cuantitativos de los sistemas de agricultura migratoria que existen en la actualidad. Se efectuaron muchos de estos estudios después que Kellogg hiciera su recomendación, pero han sido de alcance local, y sin duda todavía quedan muchas prácticas basadas en la experiencia que la comunidad científica todavía no conoce ni entiende muy bien. Un primer esbozo de tales estudios incluye literalmente cientos de posibilidades de investigación (Conklin 1963). Algunas de interés especial incluyen las siguientes (Newton 1960, Watters 1968a, 1968b, 1968c):

- Consideraciones generales -clima, suelos, factores bióticos, ambiente cultural, tendencias.
- Prácticas de quema -momento oportuno.
- Prácticas de cultivo -momento oportuno, preparación del suelo, preparación de las semillas, cercado, vigilancia, desyerbado, protección contra animales, raleo, abono vegetal, estiércol, cosecha, almacenaje de productos, cultivo secundario.
- Barbecho -necesidad, vegetación preferida, razones de tiempos, procedimientos, uso de leguminosas, relación con el suelo.
- Potencial de los fertilizantes inorgánicos complementarios.

Se prevé un cambio de énfasis en las investigaciones genéticas, como resultado de la mayor atención que ahora recibe la agroforestería (Burley 1980b). El contraste con la investigación en plantaciones industriales es evidente en las siguientes consideraciones:

- Necesidad de una gama de cultivos agrícolas y tratamientos de manejo en combinación con el cultivo de árboles.
- Comparaciones entre la variedad de usos y productos.

Cuadro 9-6.—Ventajas y desventajas de las pruebas de procedencias de árboles en la investigación forestal

Características del experimento	Diseño completamente al azar	Distribución al azar	
		Bloque completo	Cuadrado Latino
Número de réplicas	No necesariamente la misma cantidad para todas las especies	La misma cantidad para todas las especies	La misma cantidad para todas las especies
Número de tratamientos posibles (especies y procedencias)	Limitado, a menos que una cantidad demasiado grande produzca mucha variabilidad	Si son demasiados se puede perder la ventaja de los bloques	Entre 5 y 10; si son menos, el diagrama es difícil de manejar
Establecimiento del ensayo	Fácil	Bastante fácil, pero los bloques son de un tamaño fijo y deben ser cuidadosamente establecidos según su tamaño	Diseño fijo con poca variación posible
Gran variabilidad entre las parcelas	No se puede tomar en cuenta este parámetro	Se debe cuidar la variación en una o más direcciones, dependiendo del diseño de los bloques	Particularmente bueno si la variación se da en dos direcciones
Parcelas perdidas	Ninguna dificultad para el análisis	Poca dificultad, pero cierta pérdida de eficacia	Puede acarrear gran pérdida de eficiencia y dar raíz a análisis complejos
Grados residuales del libertad	Mayor número disponible	Número reducido por el número de bloques	Número reducido por filas y columnas
Diferencias en el tratamiento	El área entera se debe tratar de un modo uniforme	Los bloques pueden ser tratados de manera diferente	El área entera debe ser tratada de manera uniforme si no se desea reducir la eficacia bilateral

Fuente: Wright y Andrew 1976.

- Comunicación activa entre científicos y agricultores.
- Comprobación y conservación de las adaptaciones locales y variedades desarrolladas de muchas especies agroforestales.
- Reconocimiento de que las interacciones entre genotipos de árboles y cultivos agrícolas son tan importantes como los de procedencias arbóreas, pero mucho más difíciles de identificar.

Las prioridades de investigación identificadas en un taller efectuado en Sri Lanka (Shea y Carlsom 1986) están específicamente orientadas a los usos múltiples de

las especies arbóreas pero su importancia es mucho más extensa. Los objetivos de investigación, metas y actividades de alta prioridad se indican a continuación:

1. Selección, mejoramiento genético y conservación de especies
 - A. Selección de especies
 - B. Reproducción de árboles y propagación vegetativa
2. Establecimiento y técnicas de manejo en vivero
 - A. Métodos de recolección de semillas
 - B. Métodos de selección de sitio

- C. Técnicas de preparación de sitio
 - D. Técnicas de establecimiento
- 3. Sistemas de manejo
 - A. Espaciamiento, raleo y rotación
 - B. Consumo de agua
 - C. Interfase árbol/cultivo
 - D. Aclareo por franjas
 - E. Sistemas de irrigación
 - F. Economía de la producción
- 4. Manejo de pestes
- 5. Mantenimiento y mejoramiento de la productividad del suelo
 - A. Cultivo e inoculación con organismos fijadores de nitrógeno
 - B. Evaluación de especies fijadoras de nitrógeno
 - C. Pruebas de campo para determinar el ciclo de nitrógeno y contenido de materia orgánica
 - D. Experimentos con fertilizantes

- 6. Determinación de aspectos sociales, económicos y ambientales

A medida que se acumula información científica sobre las posibilidades de la agroforestería, se debería dar una tendencia hacia la comprobación de sistemas en vez de prácticas meramente.

El capítulo 9 ha reunido el pensamiento sobre las investigaciones forestales tropicales a partir de un gran número de fuentes bajo circunstancias diferentes. Muchas de las prácticas descritas difieren por razones no completamente elucidadas. No tenemos la intención de decidir por el lector cuáles de las alternativas descritas es la mejor para cada lugar. Se presentan todas las experiencias en toda su variedad. Está en manos de los practicantes comprobar y mejorar los juicios que se han hecho hasta la fecha.