



MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE MADERA SÓLIDA: RETROSPECTIVA DE TRES DÉCADAS EN URUGUAY

Zohra Bennadji

INIA Uruguay

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una retrospectiva de tres décadas de mejoramiento genético forestal en Uruguay, con énfasis en la obtención de madera sólida de especies de rápido crecimiento de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. El análisis se centra en los avances alcanzados por el sector público, principalmente en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Se toma como línea de base temporal la década de los 90 por: (i) el despegue de las plantaciones registrado en el sector forestal, a raíz de la aplicación de los decretos de la Ley Forestal 15.939 de 1987 (DGF, MGAP) y, (ii) el inicio de los programas de mejoramiento genético forestal con mayor envergadura y perduración a nivel nacional, tanto el sector público como en el privado. Este período corresponde también, institucionalmente, a la creación del área de investigación en producción forestal del INIA en 1990 y, al comienzo de sus líneas de trabajo en mejoramiento genético de *Eucalyptus* y *Pinus*.

Desde el punto de vista metodológico, las especies forestales de rápido crecimiento se caracterizan por sus tasas de crecimiento altas y sus rotaciones cortas, comparadas a las registradas tradicionalmente en zonas templadas. Estas especies se asocian habitualmente a especies exóticas de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, plantadas mayoritariamente en países del hemisferio sur y sometidas a paquetes silvícolas comparativamente intensos. Algunas especies de estos géneros se introdujeron en Uruguay desde el siglo XIX y su adaptación fue comprobada empíricamente en diferentes zonas agroecológicas del país, habilitando su clasificación como especies de prioridad forestal en la Ley 15.939.

Por otra parte, se entiende por programa de mejoramiento completo de una especie forestal un conjunto de acciones programáticas y operativas planificadas en el espacio y en el tiempo que desemboca en la liberación de un material de reproducción mejorado bajo la forma de semilla, de material vegetativo o de los dos (Zobel and Talbert, 1984). Estos programas de mejoramiento genético se analizan principalmente en este trabajo desde el enfoque de sus estrategias, ponderando la incorporación de criterios de selección por características de la madera, en general, y por madera sólida, en particular.

Desde el punto de vista espacial, las actividades desarrolladas por el INIA en esta temática tuvieron una cobertura nacional que sigue manteniéndose hasta la fecha. Esta cobertura espacial responde, en primer lugar, a la propia estructura geográfica de la institución y, en segundo lugar, a la caracterización y regionalización de los suelos identificados jurídica y productivamente como de prioridad forestal por la ley forestal mencionada anteriormente.



2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la elaboración de este trabajo consistió en una recopilación y análisis de los resultados obtenidos en el transcurso de la ejecución de los proyectos quinquenales de investigación desde 1992 a la fecha en el INIA, tomando como principal fuente de información su Catálogo de Información Agropecuario disponible on-line (AINFO, <http://www.ainfo.inia.uy/consulta/?initQuery=t>).

A los proyectos con financiación interna del INIA, se sumaron los financiados por fuentes externas a través de la cooperación técnica con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en 1993-1998 y 2000-2002, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 1995-2000) y Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT, 2000-2005) del Ministerio de Educación y Cultura (MEC). Esto implicó, en la práctica, la revisión de 50 documentos internos, 60 publicaciones y 50 trabajos presentados en revistas arbitradas, eventos nacionales e internacionales.

Tomando en cuenta la variedad y el volumen de información generada en estas tres décadas, los avances se sintetizaron por: (i) grupo de especies, (ii) estrategias aplicadas con énfasis en características de la madera y, (iii) descripción resumida de los principales resultados obtenidos. Dado la amplitud del período considerado, los resultados y su discusión, tendrán un grado relativamente alto de simplificación y generalización. La contextualización de estos avances se realiza en la discusión, a través del abordaje de los desafíos planteados actualmente por el cambio climático, la intensificación del uso de la tierra, las limitantes de acceso a los recursos genéticos y los avances en biotecnología y genómica y sus consecuencias sobre la necesidad de nuevos diseños de los programas de mejoramiento genético.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Especies estudiadas

Se estudiaron 15 especies de *Eucalyptus* y 3 de *Pinus*. Seis especies de *Eucalyptus* (*E. grandis*, *E. globulus*, *E. dunnii*, *E. maidenni*, *E. saligna* y *E. tereticornis*) contaron con programa de mejoramiento genético entero mientras que para *Pinus* este número se reduce a una (*P. taeda*). En la Tabla 1, se presenta una síntesis del pool de estos recursos genéticos forestales

Tabla 1. Pool genético de los programas de mejoramiento genético forestal de *Eucalyptus* y *Pinus* de INIA

Género/Especies	Fecha de inicio	Accesiones (externas y locales)
<i>Eucalyptus</i>	1991	2000
<i>Pinus</i>	1991	262
Total		2262



b. Estrategias implementadas

Las estrategias implementadas obedecieron a una serie de principios rectores dictados por consideraciones científicas y económicas. Desde el punto de vista científico, se aplicó una metodología clásica relativamente sencilla, de uso bastante generalizado a nivel internacional, basada en la evaluación y selección recurrente en poblaciones de mejora y en poblaciones de producción de polinización abierta (Eldridge, 1994). En la Figura 1, se presenta un esquema simplificado de las etapas de los programas de mejoramiento genético forestal de INIA. En los últimos años, se incursionó en la obtención de híbridos y en la aplicación de selección genómica, ambas técnicas orientadas a la búsqueda de resistencia a enfermedades. Existen actualmente en los programas de mejoramiento de INIA especies de *Eucalyptus* (*E. grandis* y *E. globulus*) con dos ciclos de mejora ya cumplidos.

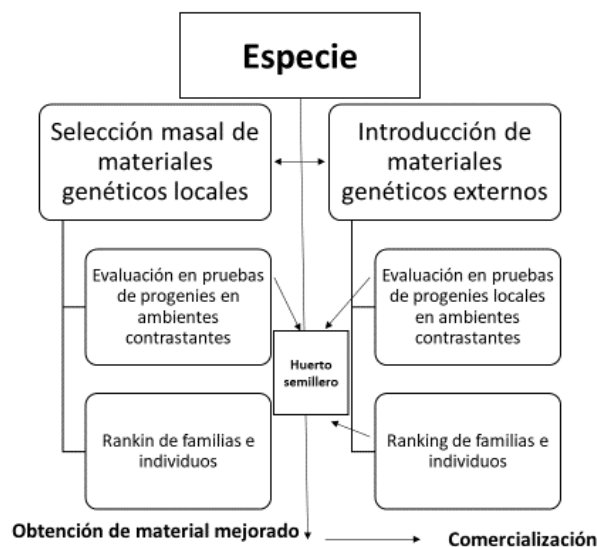


Fig.1. Esquema de las etapas de los programas de mejoramiento genético forestal de INIA

Las poblaciones de mejora son constituidas por pruebas de introducción y evaluación de especies, pruebas de orígenes y procedencias, pruebas de progenies, tests clonales y poblaciones genéticas base. Estas últimas son posteriormente manejadas como huertos semilleros. Estas poblaciones se establecieron a partir de fuentes de semillas obtenidas por dos vías: (i) selección masal de árboles plus en plantaciones locales y, (ii) introducciones desde el país de origen de fuentes de semilla de *Eucalyptus* (Australia) y desde el país de origen (EE. UU) más otros países con programas de mejoramiento avanzados (Sud África) en el caso de *Pinus*, apuntando a la constitución de una base genética la más amplia posible. Estas poblaciones se implantaron en por los menos tres



sitios ecológicamente contrastantes con la participación y el apoyo logístico de empresas y productores. Los huertos semilleros, huertos y bancos clonales constituyendo las poblaciones genética base se instalaron por razones estratégicas en predios del INIA.

En las Figuras 2 y 3, se presentan las principales etapas de los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus* y *Pinus*, asumiendo el despliegue de las actividades sobre un ciclo de mejora. En la Tabla 2, se resumen los principales tipos de selección aplicados a los distintos materiales de reproducción, los tipos de ensayos y los cruzamientos aplicados.

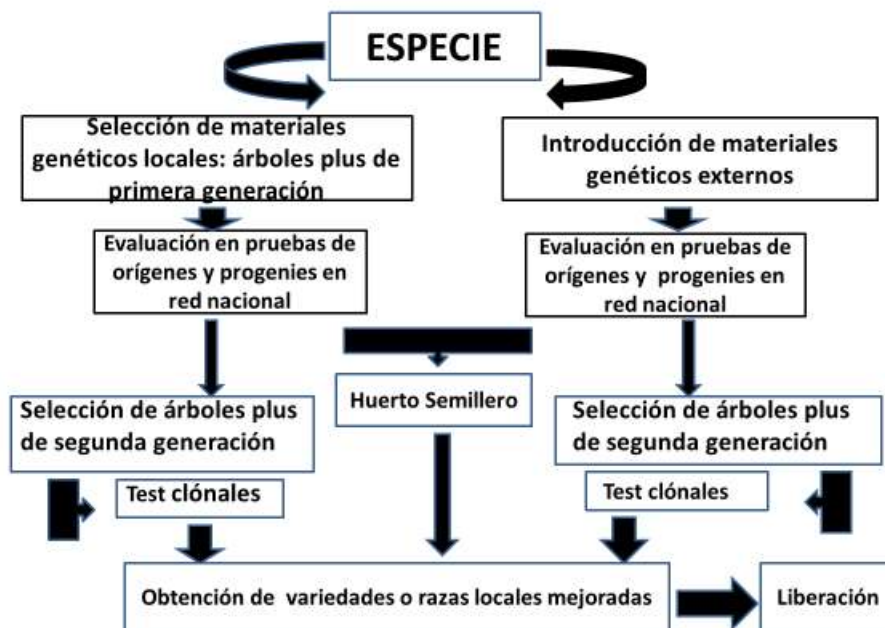


Fig. 2. Esquema de las principales etapas del programa de mejoramiento genético de *Eucalyptus* (Primera generación). Fuente: Elaboración propia.

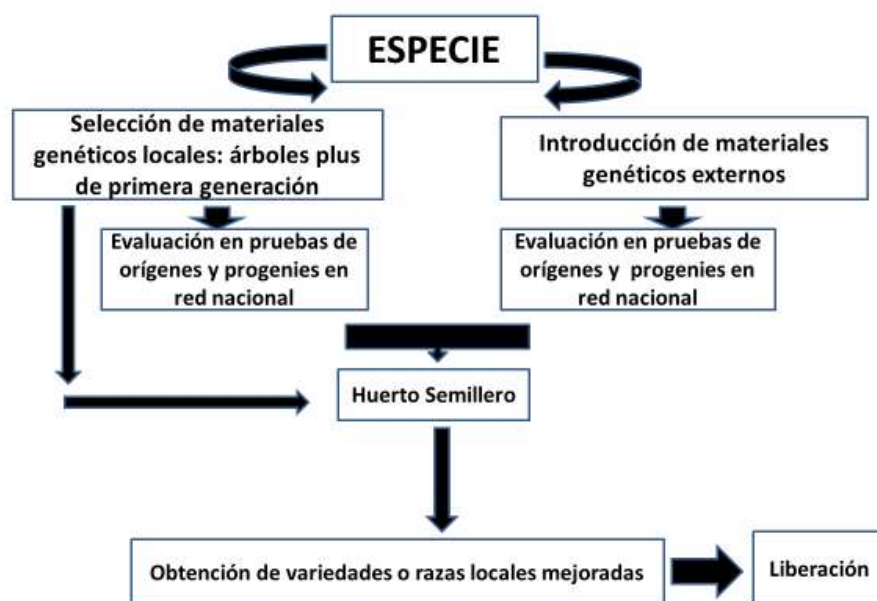


Fig.3. Esquema de las principales etapas del mejoramiento genético de *Pinus*.

Tabla 2. Métodos de selección aplicados en los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus* y *Pinus* del INIA. Fuente: Elaboración propia.

Método de selección	Material genético de base	Tipo de ensayo	Cruzamientos
Masal	Rodales	Plantaciones comerciales	No
Recurrente	Árboles candidatos Arboles plus	Orígenes y procedencias Procedencias y progenies	Polinización abiertos
Individuos dentro de familias de medio-hermanos	Árboles candidatos Arboles plus	Progenies	Polinización abierta
Familias de medio-hermanos	Árboles candidatos Arboles plus	Progenies	Polinización abierta
Clonal	Clones	Test clonales <i>in vitro</i> y <i>in situ</i>	No



Hibridación	Pruebas de progenies y poblaciones genéticas base	de y Progenies y test clonales <i>in vitro</i> y <i>in situ</i>	Polinización controlada
--------------------	---------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------	-------------------------

Desde el punto de vista económico, se apuntó al balance entre: (i) la respuesta a un amplio abanico de usuarios con diferentes intereses (madera para pulpa, madera para aserrado y energía), (ii) la cobertura de diferentes zonas ecológicas del país y, (iii) el uso eficiente de los recursos humanos y financieros disponibles. Esto significó la búsqueda de requerimientos básicos comunes de adaptación al sitio, de buena productividad y la consideración en primer lugar de criterios de selección por sobrevivencia, crecimiento, forma y sanidad. La red nacional de ensayos instalada en el transcurso de estas tres décadas incluye 106 ensayos de *Eucalyptus* y 22 ensayos de *Pinus*, con cobertura de las zonas de prioridad forestal definidas en la Ley 15.939 (Zonas 2, 7, 8 y 9).

Según la especie y el fin de uso priorizado, el ángulo de inserción de ramas, el tamaño de copa y las características de la madera fueron otros criterios incorporados posteriormente en diferentes etapas del programa de mejoramiento genético. La densidad de la madera fue central en la movilización de los esfuerzos y recursos con la mejora de las técnicas de su muestreo y medición. Estos aspectos se tratan con mayor detalle en el punto 3.3.

c. Criterios de selección

Para asegurar una base común de mejoramiento genético compartida y aceptable para diferentes fines de uso (madera para aserrado, madera para pulpa y madera para energía), el crecimiento (medido a través del DAP, altura e incremento medio anual) y la rectitud del fuste fueron los criterios de selección priorizados para el conjunto de las especies y en los diferentes ciclos de generación. Esta regla se aplicó tanto en el ranking entre individuos como en el ranking entre familias. A estos dos criterios, se sumó la sanidad ponderada fenotípicamente en las poblaciones de primera generación y cuantitativamente en las de segunda generación y criterios adicionales de ángulo de inserción de ramas, grosor de ramas, forma de copa y características de la madera.

La densidad fue la principal característica de la madera contemplada; se aplicó inicialmente como criterio de ranking para el manejo selectivo de los huertos semilleros de primera generación. Su uso se generalizó posteriormente en las poblaciones de mejora, al igual que la incorporación de otras características más específicas (contenido de lignina, rendimiento en pulpa, longitud de fibra, rajado, módulo de elasticidad etc.). El análisis de características de madera para la obtención de madera sólida se realizó sobre árboles de segunda generación de *E.grandis*, en el marco de un convenio de trabajo conjunto INIA-LATU-JICA. La tolerancia a estreses abióticos y bióticos prevaleció en los escenarios de los últimos años. En la Tabla 3, se resumen las diferentes etapas transitadas.

Tabla 3: Avances cronológicos de incorporación de criterios de selección por características de la madera y obtención de productos madereros.



Año	Etapa cronológica del PMGF*	Grado de obtención de PM**
1990-1995	Introducción de especies, orígenes y procedencias Establecimiento de las poblaciones de mejora de primera generación de las principales especies de <i>Eucalyptus</i> y <i>Pinus</i> Establecimiento de las poblaciones de producción de primera generación	Sobrevivencia al año de implantación, crecimiento en altura
1995-2000	Manejo de las poblaciones de mejora Primera liberación de variedad mejorada en <i>Eucalyptus</i> Programa de certificación de semilla forestal (INASE)	Crecimiento en altura, Dap, rectitud del tronco, ángulo de inserción de las ramas, densidad con taladro Pressler
2000-2005	Establecimiento de las poblaciones de mejora de segunda generación de <i>Eucalyptus</i> Liberación de variedades mejoradas de segunda generación de <i>Eucalyptus</i> Liberación de bloques fundación de líneas de clone de <i>E. grandis</i> Establecimiento del primer huerto semillero clonal de <i>Pinus taeda</i>	Ídem, Pilodyn, extensómetro.
2005-2010	Liberación de variedades de segunda generación de <i>Eucalyptus</i> Instalación de poblaciones de mejora de primera generación para nuevas especies priorizadas de <i>Eucalyptus</i>	Pilodyn, extensómetro, NIR
2010-2015	Ídem más hibridación	Ídem

*PMGF: Programa de mejoramiento Genético Forestal; **PM: Productos Madereros. Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de enraizamiento por encima de 70% fue utilizada como criterio de selección excluyente en el ranking de los clones obtenidos a partir de los árboles plus de primera y segunda generación.

d. Principales resultados

En estas tres décadas se lograron cuatro grandes categorías de resultados: (i) información sobre comportamiento de especies, orígenes y procedencias, (ii) conocimiento sobre los parámetros genéticos de los materiales genéticos de base, (iii) desarrollo de protocolos y herramientas de apoyo y (iv) obtención de productos tecnológicos. Todas tienen relación directa o indirecta con la obtención de productos madereros.



Con relación a la selección por características de la madera, el ritmo de su incorporación se mantuvo en las sucesivas generaciones de mejora, con ganancias genéticas reducidas pero sostenidas en el tiempo, tanto para las especies de *Eucalyptus* como para las de *Pinus*. Las ganancias obtenidas se encuentran dentro de los rangos reportados en bibliografía.

i. Información sobre comportamiento de especies, orígenes y procedencias

Los resultados sobre comportamiento de especies, orígenes y procedencias permitieron la comprobación de patrones de comportamiento por zonas ecológicas para las especies más plantadas en el país (*E.grandis*, *E.globulus* y *P. taeda*) y aportado elementos de información nuevos para otras (*E. benthamii*, *E.camaldulensis*, *E.dunnii*, *E.maidenii*, *E. saligna* y *E. tereticornis*).

Con relación al comportamiento de orígenes y procedencias, diferentes estudios basados en características de sobrevivencias, de volumen, de diámetro a la altura de pecho y de tolerancia a factores abióticos y bióticos con sus respectivas correlaciones permitieron confirmar la regla básica de la importancia de la elección de una buena fuente de semilla y la necesidad de comprobar previamente todo nuevo material de reproducción introducido en el país antes de su utilización a gran escala. Esta regla se reportó desde décadas en múltiples publicaciones internacionales para otros países.

Se identificaron las mejores fuentes de semillas australianas para las principales especies plantadas de *Eucalyptus* y para *Pinus taeda* (EE. UU y Sud África). Esta información ha perdido en cierta medida su relevancia en el caso de *Eucalyptus* frente al avance en los programas nacionales de mejoramiento genético y a la disponibilidad hoy en día de materiales locales mejorados.

ii. Parámetros genéticos

Heredabilidad

La heredabilidad se evaluó para diferentes especies, diferentes caracteres y para diferentes edades. En concordancia con la literatura disponible, en el caso de *Eucalyptus*, se registraron valores bajos a moderados entre 0 y 1, que permitieron, hechas las ponderaciones relativas a cada ensayo en particular, predecir las probabilidades de éxito de las actividades de selección llevadas a cabo. Cabe destacar los avances logrados en especies de *Eucalyptus* comparados a los registrados en el caso de *Pinus*. Se comprobó también en condiciones locales que este parámetro no es fijo y depende de: (i) la amplitud de la base genética de las poblaciones de mejora, (ii) las condiciones ambientales, y (iii) la edad de los materiales genéticos considerados.

Correlaciones entre caracteres

Las correlaciones entre caracteres se establecieron para diferentes especies, para diferentes edades y para ensayos instalados en por las menos dos zonas ecológicas. Los resultados obtenidos se enmarcaron dentro de lo esperable, de acuerdo a la bibliografía regional e internacional, detectándose correlaciones tanto positivas (altura/DaP) como negativa (velocidad de crecimiento/densidad de madera).



Correlaciones juvenil-adulto

Estas correlaciones se establecieron para algunas especies de *Eucalyptus* y para características de crecimiento y sanidad. Se han también enmarcado dentro de lo esperable (correlaciones positivas para crecimiento en altura y DaP por ejemplo).

Correlaciones genotipo-ambiente

Estas correlaciones se establecieron para diferentes especies, resultando por lo general significativamente a muy significativamente positivas. Estos datos son importantes al reflejar características propias de los ambientes locales y al implicar tomas de decisión específicas sobre estrategias de mejoramiento genético. Han servido de insumo para las actividades de mejoramiento genético en el transcurso de las tres décadas pasadas y tienen todavía vigencia para el diseño de estrategias avanzadas para los próximos años. La información recaba y las bases de datos generadas cobran un especial relieve de cara al cambio climático, la intensificación del uso de la tierra y las limitantes de acceso a los recursos genéticos (White et al., 2014)

Ganancias genéticas

Los niveles de ganancia genética para la productividad se han situado en promedio en los siguientes rangos: (i) 20 a 30% para fuentes de semillas identificadas por procedencia, (ii) 5 a 15% para huertos semilleros y (iii) 10 a 20% para variedades clonales. Existen todavía algunas interrogantes sobre estas ganancias por el grado de precisión relativo en su evaluación, debido a la edad de los ensayos en las poblaciones de mejora y a la falta, en primer lugar, de umbrales de producción claramente establecidos por especie, zona y paquete de manejo y, en segundo lugar, de umbrales definidos por el sector industrial para diferentes características de la madera (Hillis & Brown, 1984). Tampoco existe información suficiente de respaldo para la ponderación de estos umbrales desde el punto de vista económico. Sin embargo, estas ganancias son relativamente altas y, al ser acumulativas (en la medida en que el programa de mejoramiento genético es desarrollado sobre un ciclo completo y en que los materiales de reproducción genética son seleccionados sucesivamente a partir de la fase precedente), representan valores del orden de 35 a 65%.

Según algunos estudios económicos, una simple ganancia del orden de 5% en producción rentabilizaría en promedio un programa de mejoramiento genético complejo y costoso, por lo cual esta actividad es eminentemente rentable. Exige sin embargo equipos estables, bien capacitadas y trabajando de acuerdo a planes de largo plazo bien madurados.

Ciclos por generación

Ciclos generacionales de 5 años se han comprobado como viables para tres especies de *Eucalyptus* (*E. grandis*, *E. globulus* y *E. maidenii*). Esta característica de las poblaciones de producción es reforzada por la observación de floración temprana en árboles de 1 a 3 años y por la viabilidad de los lotes de semillas cosechados. Existen a su vez varias oportunidades a explorar desde el campo de la genómica para la selección temprana (Henry & Kole, 2014).

iii. Liberación de variedades



El programa cuenta actualmente con un total de cinco variedades de polinización abierta de *Eucalyptus*, de veinte líneas de clones de *E. grandis* y del primer huerto semillero clonal de *P. taeda* instalado en el país. Tomando como referencia la cantidad de semilla mejorada de *Eucalyptus* comercializada, se estima que la superficie teóricamente plantada con material mejorado del INIA supera, hoy en día, las 80.000 ha.

4. CONCLUSIONES

El uso de materiales de reproducción forestal en el Uruguay evolucionó en las tres últimas décadas desde material genético prácticamente sin identificación de origen y con estrecha base genética hasta materiales con grados progresivos de ganancias genética tanto por vía sexual (semillas) como por vía vegetativa (clones). Los mayores avances tecnológicos se registraron en especies del género *Eucalyptus*, con la generalización de la forestación clonal a nivel del país, siendo los avances en *Pinus* relativamente modestos y sin logro destacable en propagación vegetativa.

Los programas de mejoramiento genético del INIA fueron protagonistas de estos cambios tecnológicos, a la par de otras instituciones públicas y privadas. Sus aportes consistieron en: (i) información sobre comportamiento de especies, origen y procedencias de interés, (ii) generación de conocimiento sobre parámetros genéticos de los materiales de base, (iii) desarrollo de protocolos y herramientas de apoyo para el mejoramiento genético y, (iv) obtención de productos tecnológicos (variedades de semillas mejoradas y clones).

El desafío del mejoramiento genético para los próximos años consiste en dar respuestas adecuadas y en plazos razonables a una demanda cada vez más compleja. Además de alta productividad y calidad de madera, habrá que sumar la necesidad de adaptación de las plantaciones a cambios ambientales más frecuentes y de gran intensidad. Esto implica el manejo de listado de criterios de selección cada vez más extensos y ciclos de generación de mejora cada vez más reducidos para el desarrollo de variedades forestales polivalentes, adaptables a ambientes variados y cambiantes y, dotadas de una diversificación genética suficiente.

Estos escenarios plantean la importancia de la modelación para una mejor comprensión de los factores ambientales y la necesidad de incorporación de estudios económicos más afinados para la priorización de los criterios de selección. En un marco de generalización y extensión de los programas de mejoramiento genético, surge también la importancia de un manejo y conservación sostenible a mediano y largo plazo de los recursos genéticos forestales, incluidos los de las especies sin interés económico bien definido en la actualidad.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El material producido por INIA está disponible en su casi totalidad on-line en el Catálogo de Información Agropecuaria

AINFO: <http://www.ainfo.inia.uy/consulta/?initQuery=t>). El material producido por INIA y consultado para este trabajo está disponible en su casi totalidad on-line en el Catálogo de Información Agropecuaria



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

Eldridge, K.; Davidson, J.; Harwood, C.; Wyk, G. van. 1994. Eucalypt domestication and breeding. Clarendon Press. Oxford, OK. 308 p.

Henry, R. & Kole, C.; Ed. 2014. Genetics, Genomics and breeding of Eucalypts. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, London, New York. 188 p.

Hillis, W.E. & Brown, A.G.; Ed. 1984 Eucalypts for wood production. CSIRO, Academic Press. 434 p.

MGAP. DGF. Ley Forestal 15.939. <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/descarga/ley-15939-2812087>

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

White, T.; Davis, J.; Gezan, S.; Hulcr, J.; Lokela, E.; Kirst, M.; Martin, T.A.; Peter, G.; Powel, G. & Smith, J. 2014. Breeding for value in a changing world: past achievements and future prospects. *New Forests* (2014) 45:301-309