

III. 9. Mejoramiento genético en *Eucalyptus camaldulensis* y *Prosopis*

III. 9. 1. *EUCALYPTUS CAMALDULENSIS*

Autor: Carlos López

Resumen

Eucalyptus camaldulensis contiene materiales genéticos con características silviculturales y propiedades tecnológicas de su madera potencialmente adecuados para el cultivo de bosques con fines industriales en el Noroeste argentino. En Australia ocupa una amplia área de dispersión con gran variedad de ambientes que produjeron diferencias genéticas, jerarquizadas en procedencias, familias de progenies y árboles individuales que pueden ser aprovechados en el mejoramiento genético forestal.

Para comprobar su capacidad de adaptación a los diferentes ambientes de implantación y mejorar sus características de crecimiento en volumen, densidad y supervivencia por selección entre y dentro de poblaciones de diferentes orígenes geográficos, fueron introducidas familias de progenies de polinización abierta procedentes de Australia y Sudáfrica.

Los ensayos fueron establecidos en dos sitios del noroeste argentino, conforme a un diseño experimental de bloques de familias compactos con cuatro repeticiones. Los rasgos medidos fueron diámetro a 1,30 m, supervivencia y penetración de Pilodyn.

La evaluación de la interacción de las procedencias con el ambiente y de la consistencia del desempeño en diámetro y supervivencia a través de los ambientes fue realizada mediante un modelo de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas.

Los resultados revelaron interacciones altamente significativas de las procedencias con el ambiente en diámetro y supervivencia y detectaron mayor estabilidad de las materiales procedentes de Dimbulah, Petford, QLD y Gibb River, Kimberley, WA.

Para predecir los valores genéticos de los individuos, simultáneamente con el ajuste de los regis-

tros a los efectos fijos y maximizar las ganancias por unidad de tiempo, se utilizó el modelo mixto de árboles individuales (BLUP) por su capacidad para separar los efectos genéticos de los ambientales y comparar en igualdad de condiciones a árboles que crecen en diferentes ambientes.

Los resultados a nivel de progenies detectaron variación genética aditiva significativa en los rasgos analizados e interacción altamente significativas con el ambiente en diámetro. Las estimaciones de parámetros genéticos mostraron heredabilidades en sentido restringido de 0,07 y 0,34 en diámetro y penetración de Pilodyn respectivamente. Las ganancias genéticas en volumen y densidad básica estimadas con un índice de selección construido con los valores de mejora predichos son de 13,09 % y 4,16% respectivamente. La correlación genética entre los rasgos es moderadamente baja (0,4), sin embargo, su valor positivo permite su mejora conjunta.

Introducción

Bosques implantados en la Argentina

Los bosques implantados de la Argentina totalizan 780.396 ha, de acuerdo a las cifras obtenidas por el primer Inventario Nacional de Plantaciones Forestales de 1998 (SAGPyA, 2001). De este total, el 86% están representados por especies del género *Pinus* (54%) y *Eucalyptus* (32%). La mayor parte de estas forestaciones se concentran en las provincias de Misiones, Corrientes, Entre Ríos y Buenos Aires y suman más del 89% del volumen comercial total implantado y sólo el 2,57% se encuentran en la región del Noroeste argentino integrada por las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Catamarca. En esta región se asienta el 10,6% de la población nacional y sus habitantes observan una situación socio-económica desfavorable.

Si bien la producción del bosque implantado en el noroeste argentino aún es incipiente, cuenta con amplias superficies ociosas potencialmente aptas para la implantación de especies de rápido crecimiento para satisfacer la demanda de productos leñosos y contribuir a la generación de fuentes de trabajo y disminución de la deforestación del monte nativo.

Entre las especies exóticas introducidas en esta región son muy importantes las del género *Eucalyptus* porque cuenta con especies que crecen desde los climas fríos hasta los cálidos con propósitos variados que incluyen madera para la industria, aceites esenciales, abrigo, construcciones y combustible, entre otros usos. En el mundo constituyen las plantaciones con madera dura más importantes (Turnbull, 1991).

Por esta razón se torna necesaria la comprobación de su capacidad de adaptación a los diferentes ambientes de implantación y mejorar sus características asociadas a la productividad forestal. Para estos fines es necesario la definición de los componentes genéticos y ambientales de la variabilidad fenotípica entre y dentro de poblaciones de diferentes orígenes geográficos (Kageyama, 1980).

El conocimiento del comportamiento de los genotipos en las diferentes condiciones del ambiente permitirá la recomendación de los materiales más estables para variadas condiciones de sitio y aportar a la adecuada planificación de la estrategia de mejoramiento (Falkenhagen, 1985).

Eucalyptus camaldulensis

Eucalyptus camaldulensis (eucalipto rojo) es una especie que contiene materiales genéticos con características silviculturales y propiedades tecnológicas de su madera potencialmente adecuados para el cultivo de bosques con fines industriales en el Noroeste argentino (Golfari, 1985). Es la especie del género *Eucalyptus* que tiene el área de dispersión más amplia en Australia y abarca una gran variedad de ambientes, desde los templados del sur con lluvias invernales y veranos secos hasta la región central extremadamente seca. Sobre la base de caracteres morfológicos y fisiológicos, Pryor y Byrne (1969) sostiene que esta especie se podría dividir en dos entidades, cuyo límite de ocurrencia sería aproximadamente el paralelo de 27° S.

La división de la especie en procedencias del Grupo Sur y Norte fue reconocida en varios estudios. Las procedencias características del grupo Norte son Catherine (NT) y Petford (QLD) y en el Grupo Sur,

Lake Albacutya (VIC) (Eldridge *et al.* 1993).

Eucalyptus camaldulensis ocupa un rango latitudinal que va desde los 12° a los 38° de Latitud Sur y altitudinal de 20 a 700 m.s.n.m. Si bien ocupa sitios con precipitaciones superiores a 1000 mm anuales, vegeta principalmente en zonas ribereñas con precipitaciones invernales que oscilan entre 250 y 650 mm por año y 4 a 6 meses de estación seca rigurosa.

La temperatura máxima media del mes más cálido de su área de ocurrencia es 35° C, la temperatura mínima media del mes más frío es de 11° C y la temperatura mínima absoluta es de -6,7° C. El periodo de heladas varía entre 0 y 50 días por año.

Esta amplitud de ocurrencia natural llevó esa especie a vegetar exitosamente en varios países en forestaciones que suman alrededor de 500.000 hectáreas que se incrementan rápidamente especialmente en áreas tropicales (Eldridge *et al.* 1993).

En su hábitat natural los ejemplares pueden alcanzar hasta 30 m de altura y 2 m de diámetro. Posee un tronco a menudo bifurcado y torcido y copa extendida con ramas pendulares.

Su madera es de color rojizo, dura y pesada. El peso específico verde es 1,19 kg/dm³ y el seco 0,89 kg/dm³. En Australia es una de las maderas más durables en contacto con el suelo. Su albura es fácilmente penetrable por los líquidos preservantes, no así su duramen.

Habitualmente su madera se destina a las industrias de trituración para la fabricación de tableros de partículas y de fibra. Ocasionalmente se fabrican productos aserrados de regular calidad. Proporciona carbón y leña de buena calidad.

En la Argentina se difundió desde la provincia de Río Negro hasta Jujuy en forma de forestaciones en macizo, cortinas y montes de reparo y tolera temperaturas de hasta -8° C en condiciones adecuadas de humedad.

El mejor rendimiento de esta especie se logra en suelos ricos, sueltos y profundos pero tolera bien los suelos pobres, superficiales, compactos, arcillosos, pedregosos y de escasa o nula permeabilidad.

Vista la necesidad y la posibilidad de establecer bosques productivos con fines industriales en el noroeste argentino para proveer de materia prima

con características deseables de crecimiento en volumen y densidad para alimentar a la demanda de madera de obra y combustible, la hipótesis de trabajo propuesta fue:

- Que existirían materiales genéticos que se adecuen a las condiciones de los sitios del noroeste argentino entre y dentro de procedencias del *Eucalyptus camaldulensis*.
- Que es posible disponer de semilla mejorada por selección entre procedencias y progenies de polinización abierta.

Objetivos

Objetivo general:

Evaluación de la variabilidad genética de procedencias y progenies de *Eucalyptus camaldulensis*.

Objetivos específicos:

- Evaluación del efecto de la interacción de las procedencias con el ambiente.
- Identificación de las procedencias más promisorias en cada sitio de ensayo.
- Estimación de parámetros genéticos y ganancias esperadas.
- Estimación de los valores de mejora individuales y construcción de un índice de selección.

Materiales y métodos

Los materiales introducidos constan de un número variable de familias de progenies de polinización abierta de 13 procedencias australianas y una africana que totalizan 104 familias de progenies de polinización abierta y 2 testigos de semillas comerciales. Los materiales genéticos se listan en el Cuadro 1.

Cuadro 1.- Detalle del material genético

Proced.	Localidad	Latitud	Longitud	Altitud	Nº de Familias
A	Emu Creek, Petford, QLD	17° 20'	144° 58'	460	11
B	Huerto Semillero de Zimbabwe, África	-	-	-	12
C	Dimbulah, Petford, QLD	17° 15'	145° 00'	500	09
D	Gibb River, Kimberley, WA	16° 08'	126° 38'	430	10
E	8 km west of Irvinebank, QLD	17° 24'	145° 09'	680	10
F	South of Katherine, NT	14° 30'	132° 15'	110	09
G	Ord River, WA	17° 29'	127° 57'	360	06
H	Gilbert River, QLD	18° 30'	142° 52'	460	04
I	Dunham River, WA	16° 20'	128° 40'	600	03
J	Gilbert River, QLD	17° 10'	141° 45'	30	04
K	Wyalba Creek, QLD	16° 43'	142° 00'	30	08
L	Kimberleys, WA	15° 40'	126° 23'	400	05
LL	Lennard River, WA	17° 23'	124° 45'	60	09
M	Fitzroy River, WA	18° 11'	125° 36'	150	02
SA	Testigo comercial de Sudáfrica				
T	Testigo comercial de Mendoza				

Diseño experimental

Los ensayos se implementaron conforme a un diseño experimental de Bloques de Familias Compactos con cuatro repeticiones, sub-parcelas lineales de cinco plantas y bordura perimetral simple. Este diseño localiza las procedencias en las parcelas y a las familias en las sub-parcelas. El dis-

tanciamiento de plantación es 3 m entre familias y 2 m entre plantas.

Localización de los ensayos

Los ensayos fueron plantados en enero de 1996 en las localidades de El Zanjón, Santiago del Estero y Famailá, Tucumán. Las provincias de Santiago del

Estero y Tucumán pertenecen a la Región del Noroeste argentino.

El Zanjón se encuentra a 27° 46' Latitud Sur; 64° 18' Longitud Oeste y a 188 m.s.n.m. Presenta un régimen de precipitaciones de tipo monzónico que varía entre 500 y 550 mm anuales, entre los meses de noviembre y marzo. La evapotranspiración potencial es de 1000 mm anuales. El suelo pertenece al orden Entisoles, gran grupo Torrifluent, subgrupo Típico, con horizontes A, AC y C, sin limitaciones de profundidad y drenaje. Es un suelo sódico con salinidad leve. Los valores de pH varían entre 7,5 y 10, en sentido horizontal y profundidad.

La temperatura máxima media del mes más cálido (enero) es 32,5° C; la temperatura mínima media del mes más frío (julio) es 2,9° C y la temperatura mínima absoluta es -7° C. Las heladas ocurren de Junio a Agosto y hay más de 300 días libres de ellas. Los vientos predominantes soplan de norte a sur, especialmente en agosto.

Famaillá está ubicada a 27° 03' Latitud Sur; 65° 25' Longitud Oeste y 363 m.s.n.m. de Altitud.

El régimen de precipitaciones es de tipo monzónico con un promedio de 1.200 mm anuales, entre los meses de noviembre y marzo. La evapotranspiración potencial es de 1100 mm anuales. El suelo pertenece al orden Molisoles, gran grupo Hapludol, subgrupo Entico. El pH es neutro y no se observan limitaciones de profundidad y drenaje.

La temperatura máxima media del mes más cálido (enero) es 30,5° C; la temperatura mínima media del mes más frío (julio) es 5° C y la temperatura mínima absoluta es -4,5° C. Ocurren entre 10 y 15 heladas por año de Junio a Agosto. Los vientos predominantes soplan de norte a sur, especialmente en agosto.

Evaluación de los ensayos

Las variables utilizadas fueron el diámetro medido con cinta dendrométrica a 1,30 m (Dap), penetración de aguja de Pilodyn (Pilo) utilizando un equipo con impacto de 6 Joules, y supervivencia, todas medidas al quinto año de implantación.

Metodología estadística para evaluación de las procedencias

La descomposición de la variación total, la estimación de la interacción de las procedencias con el ambiente y la identificación de las procedencias

con rendimiento consistente a través de los ambientes, fue realizada a través de análisis univariados y multivariados. Esta última perspectiva explora la relación entre los ambientes y las procedencias (Romagosa y Fox, 1993; Royo *et al.* 1993).

La evaluación de los genotipos y ambientes fue complementada con gráficos que ubican la producción media de las procedencias y sitios sobre ejes coordinados y resumen simultáneamente la información de los efectos genotípicos y ambientales y de su interacción.

Metodología estadística para la evaluación de progenies

Estimación de valores genéticos

El valor genético de un árbol es la descripción del valor de sus genes cuando son traspasados a su progenie. Estos valores no son conocidos para la mayoría de los rasgos, pero se pueden predecir utilizando funciones de sus datos observados (Borralho, 1998).

El objetivo principal de un programa de mejoramiento genético forestal es la selección de individuos con características deseables para utilizarlos como progenitores en una próxima generación (Torres y Gezan, 1998).

La evaluación de la calidad de estos individuos se realiza a través de pruebas de progenies que tienen principalmente la finalidad de predecir sus valores de mejora sobre la base del desempeño de su descendencia. En general, un proceso de selección primero ordena los candidatos usando alguna función de los datos observados, y luego elige una porción de los valores más altos (o más pequeños) de la función (White y Hodge, 1989).

En consecuencia, la selección opera sobre un "ranking" de los árboles candidatos jerarquizados por sus valores de mejora predichos.

Existen varios métodos para jerarquizar genotipos que varían en complejidad y precisión (White y Hodge, 1989; Torres y Gezan, 1998).

Predicción de valores de mejora a través de un modelo de árboles individuales

Los métodos comúnmente utilizados para el ordenamiento de genotipos se tornan ineficientes para la selección de los mejores individuos debido a las diferentes fuentes de desequilibrio de las pruebas genéticas. Cuando la calidad y cantidad de los

datos de los genotipos que están siendo evaluados son diferentes y se trata de predecir valores genéticos y no simplemente de estimar promedios familiares, es necesario el empleo de métodos más precisos (White y Hodge, 1989).

Las predicciones de los valores genéticos mediante métodos que tratan a estos efectos como aleatorios, tienen propiedades estadísticas más deseables que las estimaciones de los promedios familiares. Por esta razón, la aplicación del *modelo de árboles individuales* en los programas de mejoramiento genético se hizo extensiva a otras áreas debido a su capacidad de usar toda la información que se genera en un programa de mejora. La extensión de esta teoría al área forestal es reciente, pero sin duda llegará a ser el método escogido en la evaluación genética de árboles en un futuro cercano (Borralho, 1998).

Estimación del valor genético de varios rasgos

En mejora genética vegetal y animal, generalmente se registran datos de varios rasgos debido a que la rentabilidad global de un cultivo está influida por más de una característica. El análisis simultáneo de estas características provee ventajas adicionales como el aprovechamiento de la correlación genética y ambiental entre rasgos para:

- Beneficiar la precisión de la estimación de la heredabilidad, sobre todo del rasgo que muestra el menor valor en este parámetro.
- Proveer estimaciones insesgadas de los valores genéticos en los casos en que hubo selección previa en algún rasgo y se dispone de individuos con diferente número de observaciones.

Cuanto mayor es la diferencia entre la correlación genética y la ambiental, mayor es la contribución de los rasgos correlacionados a la reducción de la varianza del error de predicción.

Si se establecen ensayos genéticos en ambientes que difieren considerablemente y no se puede asumir el supuesto de varianzas comunes (Borralho, 1998), se puede analizar un rasgo en distintos ambientes como rasgos diferentes. También, se puede evaluar la interacción de los genotipos con el ambiente como una medida de la correlación de esos rasgos entre sitios (Apiolaza, 1992). Otra aplicación útil del análisis multivariado es el análisis de la correlación entre la edad juvenil y la adulta para un rasgo particular como rasgos diferentes.

Estimación de parámetros genéticos

Debido al carácter contrastante de los sitios ensa-

yados, se esperan varianzas heterogéneas en los diferentes niveles de efectos fijos y aleatorios, e interacción significativa de los genotipos con el ambiente. En consecuencia, no es razonable ajustar los datos a un modelo que asume varianzas homogéneas (Borralho, 1998).

Para discriminar la influencia de los diferentes efectos se efectuó el análisis univariado y bivariado de los datos por sitio y en conjunto, utilizando un modelo mixto de árboles individuales conforme a la siguiente notación matricial:

$$Y = X\beta + Zu + e$$

En esta expresión, y es el vector de los datos de cada árbol; β es el vector de los efectos fijos; u es el vector de los efectos genéticos aditivos no observables; X y Z las matrices de incidencia que relacionan las observaciones a los efectos fijos y aleatorios del modelo respectivamente.

Los datos fueron ajustados a los efectos fijos de bloques para excluir su influencia en la varianza fenotípica total (Borralho, 1998). Los modelos que convergieron fueron comparados y escogidos por su función de máxima verosimilitud (LogL). La importancia de los efectos fijos fue testada mediante una prueba de F incremental que prueba sucesivamente un efecto con los restantes del modelo y la inclusión de los efectos aleatorios fue testada mediante la Prueba de la Razón de Verosimilitud (LRT) (Searle, 1971).

Los componentes de la varianza para cada rasgo fueron determinados por Máxima Verosimilitud Restringida (REML) y los valores de mejora fueron predichos usando el mejor predictor lineal insesgado (BLUP).

Índice de selección

La rentabilidad es una función de varios rasgos que se maximiza incrementando el ingreso, reduciendo los costos, o ambos (Apiolaza, 2001).

Los rasgos que afectan la rentabilidad forman parte del *objetivo de mejoramiento*. Sin embargo, como su medición puede resultar muy cara o inaccesible (Torres y Gezan, 1996), una manera de resolver este problema es medir otras características llamados *critérios de selección* y usarlos para predecir los valores genéticos de los rasgos objetivos (Apiolaza, 2001).

Normalmente se dispone de información sobre varios rasgos de individuos disponibles para la selección y se desea ordenar todos los candidatos

mediante un sistema que optimice la información de los datos (White y Hodge, 1989). Sin embargo, la ganancia genética disminuirá a medida que se incremente el número de características seleccionadas o se combinen rasgos negativamente correlacionados (Cotterill y Dean, 1990).

El fenotipo de un rasgo cualquiera no se parece al genotipo debido a los efectos ambientales y genéticos no aditivos. Esto impide que el valor genético agregado se pueda reconocer directamente y hace necesario utilizar una variable conocida como índice de selección, basada en el desempeño fenotípico de cada individuo en varios rasgos y correlacionada con el valor genético agregado.

Sin embargo, en general se dispone de información de varios rasgos de variada importancia económica y proveniente de varias fuentes de cada individuo. En estos casos los datos no son balanceados y no se puede desarrollar un simple conjunto de coeficientes para todos los individuos. En estas circunstancias, es conveniente confeccionar un índice que provea el mérito genético total de cada árbol sumando sus valores de mejora predichos de cada rasgo, ponderados por sus respectivos pesos económicos (Rodríguez, 2004; Com. Per.).

Para los rasgos diámetro y penetración de Pilodyn, definidos como *criterios de selección*, correspondería la siguiente expresión:

$$I_s = u_d w_d + u_p w_p$$

donde: I_s es el índice de selección, u_i los valores BLUP de mejora de los rasgos y w_i su importancia económica correspondiente.

La selección de los candidatos se efectúa del ranking de los méritos genéticos provistos por el índice, según el escenario definido por diferentes pesos económicos e intensidades de selección propuestos, si el sentido de los rasgos fuera concurrente con el de los objetivos de la mejora.

Una propiedad importante del BLUP es que las predicciones de los valores de mejora son estimaciones directas de la ganancia genética (White y Hodge, 1989). En consecuencia, las estimaciones de ganancia en cada rasgo se efectuarán con el promedio aritmético de los valores de mejora de los individuos seleccionados respecto del promedio general, conforme a las intensidades de selección y las relaciones de pesos económicos usadas.

Resultados y discusión

Los resultados del análisis de varianza (Cuadro 2) sugieren la existencia de variabilidad genotípica tanto a nivel de procedencias como de familias de progenies. La influencia del efecto del sitio sólo resulta significativa en la supervivencia, en tanto que la interacción de las procedencias con el ambiente es significativa en diámetro y supervivencia.

Cuadro 2.- Análisis de la varianza conjunto en Diámetro, Supervivencia y Pilodyn

	Diámetro	Supervivencia	Pilodyn
F.V.	Prob > F	Prob > F	Prob > F
Sitios	0.414	0.034	0.429
Bloque(sitio)	<.0001	<.0001	0.001
Procedencias	0.039	0.018	0.002
Flia(Procedencias)	0.009	0.004	<.0001
Sitio*Procedencias	<.0001	<.0001	0.470
Supervivencia	0.0003		

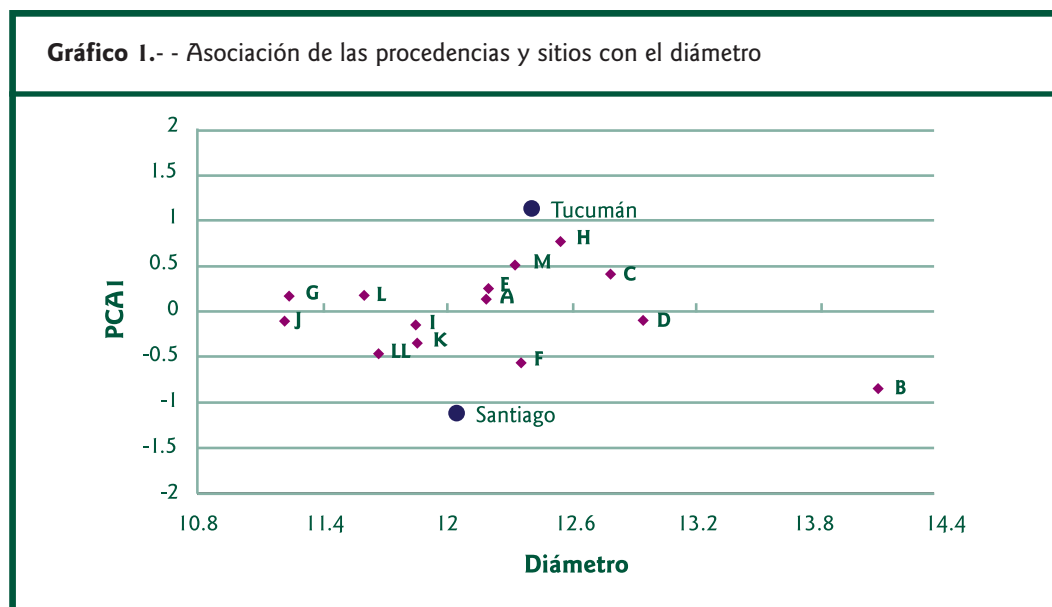
La interacción de los genotipos con el ambiente indica un ordenamiento diferente de las procedencias en los sitios probados. Esto reduce la asociación entre los valores genotípicos y fenotípicos (Romagosa y Fox, 1993) y dificulta la recomendación general de materiales genéticos.

La selección de los materiales debe atender a la solución óptima entre la adecuación de las procedencias con los sitios y su desempeño medio en diámetro. El Gráfico 1 provee los valores de las procedencias y sitios junto con crecimiento medio en diámetro. De esta manera, los materiales que mejor

resuelven esa situación de compromiso son C y D en Tucumán y Santiago del Estero respectivamente.

Considerando ambos sitios conjuntamente, las

procedencias que lideran en los valores de adaptación y crecimiento en diámetro se encuentran C y D, procedentes de Dimbulah, Petford, QLD y Gibb River, Kimberley, WA respectivamente.



Estos resultados coinciden con las evaluaciones llevadas a cabo por el Instituto de Investigaciones y Experiencias Forestales (IPEF) en 1989 en Paraopeba, Minas Gerais (Brasil), donde además de las procedencias citadas, logran buen desempeño F y A, procedentes de Katherine, NT y Petford, QLD respectivamente (Gava de Souza, 1992; Com. Per.). Cabe destacar que las condiciones edafoclimáticas de esta región, conocida como Cerrado, sobre todo en la pobreza de sus suelos, es coincidente con las de Santiago del Estero.

Estos resultados también son coherentes con el comportamiento esperado según la propuesta de Eldridge *et al.*, (1975) que citan la existencia de dos grupos de procedencias bien diferenciadas. Este autor divide las procedencias de *Eucalyptus camaldulensis* en procedencias del Grupo Norte y Grupo Sur. Las primeras muestran buen comportamiento en áreas tropicales y subtropicales con lluvias de verano como en los sitios ensayados, en tanto que las del Sur se adaptan mejor a los ambientes con lluvias de invierno.

Otros autores que utilizan rasgos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos en la diferenciación de regiones de procedencias de *Eucalyptus camaldulensis* citadas, también sugieren que la variación entre poblaciones diferentes siguen los gradientes de longi-

tud y latitud. Las características morfológicas de las hojas son rasgos útiles para la discriminación taxonómica del género *Eucalyptus* y para la diferenciación entre procedencias que siguen gradientes de latitud y longitud (Pryor y Byrne, 1969).

La elección de los materiales genéticos según su adaptabilidad también está en función del tamaño del emprendimiento forestal (Falkenhagen, 1985). Se espera que las forestaciones que involucran grandes superficies posean terrenos de variada calidad. En consecuencia, es razonable escoger materiales con rendimiento consistente entre sitios para grandes superficies.

En este contexto los materiales designados como C y D debieran escogerse para los sitios de Tucumán y Santiago del Estero respectivamente, debido a su mejor resolución del compromiso entre adaptabilidad y crecimiento en diámetro para grandes forestaciones.

El material de huerto semillero de Zimbabwe que se destaca como el más productivo entre los ensayados, no puede ser recomendado para todos los ambientes debido a su distanciamiento de la línea de adaptación general, sino en lugares específicos de Santiago del Estero y para emprendimientos productivos medianos o pequeños.

Una recomendación más precisa de los materiales para cada sitio debe atender también a su estabilidad (López y Fornés, 1997). Para estos fines, es recomendable observar el desempeño de las procedencias a través del tiempo.

Estimación y predicción

La estimación y predicción de los efectos fijos y aleatorios respectivamente, que permiten calcular los parámetros genéticos y evaluar las posibles estrategias de selección, se reportan en las tablas siguientes.

Cuadro 3.- Promedios, parámetros genéticos y errores estándar estimados por sitio

Parámetros	Sitios			
	Santiago		Tucumán	
	Dap	Pilo	Dap	Pilo
Promedio	12.12 (0.2)	10.152 (0.07)	12.38 (0.17)	9.90 (0.10)
Coefficiente de Variación Genética Aditiva (%)	4.08	8.17	12.7	8.52
Heredabilidad	0.022 (0.04)	0.387 (0.11)	0.21 (0.06)	0.4 (0.20)
Correlación genética Dap Dap	0.42			
Correlación genética Pilo Pilo	0.85			

Los valores del promedio general para ambas variables del Cuadro 3 muestran desempeños semejantes en ambos sitios.

Los coeficientes de variación genética aditiva que comparan los niveles absolutos de variación genética aditiva y la capacidad de los rasgos para responder a la selección, en general son consistentes con los valores de alrededor del 9 % que reporta la bibliografía (López *et al.* 2002). El valor de 4,08 % para el diámetro en Santiago muestra que la expresión genética de este rasgo no es estable a través de los ambientes y tiene poca capacidad para responder a la selección en este sitio. Consecuentemente, la heredabilidad en sentido estricto de ambos caracteres es coherente con los valores de coeficiente variación genética aditiva. En Santiago del Estero la heredabilidad del diámetro es muy baja por efecto de la fuerte interacción de los genotipos con el ambiente. Esta presunción se verá corroborada mediante el análisis de correlación entre sitios. En este sentido, Borralho, (1998) cita que la interacción es biológica y agrícola importante si la correlación genética entre los mismos rasgos en sitios diferentes es menor que 0.8. Como consecuencia de la interacción GxE, toda estimación genética para diámetro por sitio individual carece de sentido (Rodríguez, 2004; Com. Per.) y es conve-

niente efectuar el análisis conjunto para promover una estimación general de los parámetros genéticos así como de la ganancia genética esperada.

Las estimaciones de parámetros genéticos que provienen del análisis conjunto se muestran en el Cuadro 4.

El valor de heredabilidad en sentido estricto de pilodyn es consistente con las estimaciones que ofrece la bibliografía (Tibbits y Hogge, 1998; López *et al.* 2002) y su estimación en diámetro observa un incremento considerable debido a la exclusión de la interacción genotipo-ambiente efectuado por el análisis conjunto.

Los niveles absolutos de variación genética aditiva señalan que los rasgos tienen capacidad para responder a la selección ya que los coeficientes se sitúan alrededor del 8%, valores menores pero cercanos al 9 % reportado por la bibliografía (López *et al.* 2002).

La correlación ambiental indica que la acción de algunos factores ambientales que tienen efecto sobre ambos rasgos es pequeña y produce efectos inversos. La correlación genética acusa el efecto pleiotrópico de los genes, es decir, la acción sobre ambos rasgos. En

Cuadro 4.- Promedios, parámetros genéticos y errores estándar estimados

Parámetros	Variables	
	Dap	Pilodyn
Promedio	10.83 (0.97)	10.16 (0.43)
Heredabilidad	0.0738 (0.03)	0.3446 (0.09)
Coefficiente de Variación Genética Aditiva (%)	8.0	7.41
Correlación genética	0.544 (0.266)	
Correlación ambiental	-0.426 (0.062)	

este caso, la correlación genética entre el diámetro y la penetración de pilodyn es moderadamente baja (0.4) y positiva, indicando la posibilidad del mejoramiento conjunto de ambos rasgos. Los coeficientes de los índices de selección multicri-

terio estimados para los pesos económicos propuestos y las correspondientes ganancias se muestran en el Cuadro 5. Los resultados de ganancia indican que la rentabilidad global será mayor con la selección de los individuos sobre la base del mérito genético total.

Cuadro 5.- Coeficientes de los índices de selección y ganancias en volumen y densidad

Ponderación		I Dap : 3 Pilo	Igual énfasis	3 Dap : 1 Pilo
Coeficiente b	Diámetro	0.27014	1.33945	2.4087
	Pilodyn	-3.7246	-0.23098	3.2626
Ganancia (%)	Volumen	12.65	13.03	13.09
	Densidad	4.34	4.24	4.16

Conclusiones

1- La variabilidad genética entre las procedencias y progenies de *Eucalyptus camaldulensis* introducidas en el noroeste argentino es significativa y puede ser aprovechada para la mejora del volumen, densidad básica y adaptación por selección entre y dentro de procedencias. Las procedencias interactúan significativamente con el ambiente de los sitios de Noroeste argentino en su desempeño en diámetro y supervivencia y conviene la selección acotada a cada sitio de destino.

- La procedencia más promisorias para Tucumán es Dimbulah, Petford, QLD y Gibb River, Kimberley, WA para Santiago del Estero.
- Para emprendimientos productivos de pequeña y mediana envergadura en Santiago del Estero se puede utilizar el material del huerto semillero de Zimbabwe dado su desempeño excelente en volumen, a pesar de su moderada adaptación al ambiente de este sitio.

2- Las progenies interactúan significativamente con

el ambiente de los sitios ensayados en su desempeño en diámetro y son independientes de los mismos en penetración de pilodyn. La estimación de parámetros genéticos a nivel de progenies se logra mediante el análisis multivariado conjunto de sitios.

- La estimación de heredabilidad en sentido restringido en diámetro es baja (0,07) y en penetración de pilodyn es moderadamente alta (0,43).
- La correlación genética entre el diámetro y la penetración de pilodyn es moderadamente baja (0,4), y positiva.

3- Los parámetros genéticos de los criterios de selección, diámetro y penetración de pilodyn estimados a través de la aplicación de modelos mixtos de árboles individuales permiten estimar las ganancias en los objetivos de selección, volumen y densidad básica.

- La ganancia genética esperada en volumen y densidad básica estimadas con un índice de selección construido con los valores de mejora predichos y una intensidad de selección del 1 % son de 13,09 % y 4,16 % respectivamente para una ponderación de uno a tres en los rasgos respectivos.

Continuidad del programa de mejoramiento

La continuidad del Programa está orientada principalmente al establecimiento de un Huerto Semillero Clonal por selección fenotípica individual. Las ganancias estimadas con diferentes presiones de selección se pueden lograr por recombinación de los individuos selectos en un área de producción de semillas. La estrategia de mejora por selección “hacia adelante” a través de la construcción de un huerto semillero clonal con los individuos selectos por el índice de selección se muestra como la mejor opción para captar la variación genética disponible. En este sentido el establecimiento del huerto es inminente ya que están encaminadas las tareas de propagación agámica de los individuos selectos.

La transformación de los ensayos en huertos semilleros de plántulas a través de raleos también puede proveer de semilla mejorada para las plantaciones operacionales. Estos raleos deberán ser sucesivas para evitar que los árboles sean derribados por el viento y para acompañar las evaluaciones periódicas que brindarán informaciones cada vez más precisas de los parámetros genéticos y de la importancia económica de los rasgos. Esta actividad ya fue realizada en la provincia de Santiago del Estero y se dispone de un área de producción de semillas.

Con el propósito de continuar con la evaluación y selección de nuevos genotipos se prevé incorporar variabilidad genética mediante la infusión de material genético procedente de plantaciones comerciales y de nuevas introducciones para implantar nuevos ensayos cooperativos en el NOA.

Acciones de transferencia

Jornadas Forestales de Santiago del Estero. I Jornada sobre potencialidad foresto industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Junio 2005

Publicaciones

Estabilidad genética de orígenes de *E. camaldulensis*. IX Jornadas Técnicas de Eldorado. 2002. Variación genética en procedencias y progenies de *Eucalyptus camaldulensis* introducidas en el noroeste argentino. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes - Septiembre de 2004

Incidencia de la calidad de la semilla en la plantación de bosques productivos. Carlos López. Jornadas Forestales de Santiago del Estero. I Jornada sobre potencialidad foresto industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Junio 2005

Caracterización Macroscópica de las Cortezas de Progenies de *Eucalyptus camaldulensis* Jornadas Argentinas de Botánica Octubre 2003. Moglia J.G.

Selección individual en familias de progenies de polinización abierta de *Eucalyptus camaldulensis*. Jornadas Forestales del Mercosur 19 al 22 de Noviembre de 2003 Facultad de Recursos Naturales – UnaF.

Evaluación de la calidad de madera de diferentes progenies de *Eucalyptus camaldulensis* en Santiago del Estero. Jornadas Forestales del Mercosur 19 al 22 de Noviembre de 2003 Facultad de Recursos Naturales – Moglia J.G

Referencias

- Apilolaza, L. 2002. *ASReml Cookbook*.
http://uncronopio.org/luis/asrem_l_cookbook.html
- Apiolaza, L. and Greaves, B. 2001. Why are most breeders not using economic breeding objectives? In: IUFRO Conference "Developing the Eucalypt of the Future". Valdivia, Chile.
- Baker, R. J. 1988. Tests for crossover genotype-environmental interactions. *Can. J. Plant Sci.* 68:405-410.
- Borralho, N.M.G. 1995. The Impact of Individual Tree Mixed Models (BLUP) in Tree Breeding Strategies Hardwood Forestry, Plant Science Dept. University of Tasmania, 252C, Hobart, Tasmania, 7001, Australia.
- Cotterill, P. and Deen, C. 1990. Successful Tree Breeding with Index Selection. CSIRO Publications, Melbourne. 81 pp.
- Eldridge, K. G. 1975. An Annotated Bibliography of Genetic Variation in *Eucalyptus camaldulensis*. Publisher: Oxford Forestry Institute. ISBN: 0-85074-023-1
- Eldridge, K. G., Davidson, J., Hardwood, C. E. and van Wyk, G. 1993. Eucalypt Domestication and Breeding. Clarendon, Oxford. pp. 60-72.
- Falkenhagen, E. 1985. Genotype by Environmental Interactions in South African Pine Progeny Trials: Implications for Tree Breeding. Pretoria, South Africa.
- Golfari, L. 1985. Distribución regional y condiciones ecológicas de los eucaliptos cultivados en la Argentina. Problemas inherentes. CIEF. Publicación Técnica N° 1. Buenos Aires.
http://uncronopio.org/luis/asrem_l_cookbook.html
- Kageyama, P. 1980. *Variação genética em progênies de uma população de E. grandis*. Tesis doctoral. ESALQ - Universidad de San Pablo, Piracicaba, S.P. Brasil, 125 pp.
- López C. y Fornés, L. 1997. Estabilidade genética em progênies de *E. grandis* (Hill) ex Maiden. In: IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts. Salvador, Brasil. Proceeding. Colombo: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. v.1, p. 163-168.
- López, G.A.; Potts, B.M.; Dutkowski, G.V.; Apiolaza, L.A.; Gelid, P.E. 2002. Genetic variation and inter-trait correlations in *Eucalyptus globulus* base population trials in

- Argentina'. *Forest Genetics*, 9 223-237 [A1].
- Pryor, L.D. and Byrne, O.R. 1969. Variation and taxonomy in *Eucalyptus camaldulensis*. *Silvae Genetica* 18, 64-71.
- Romagosa, I., Fox, P.N. 1993. Genotype x environment interactions and adaptation. In:
- Hayward, M.D., Bosemark, N.O., Romagosa, I. Plant Breeding. Principles and prospects. London. Chapman & Hall. Cap. 20.
- Royo, C., Rodríguez, A., Romagosa, I. 1993. Differential Adaptation of Complete and Substituted Triticale. Paul Parey Scientific Publishers, Berlin and Hamburg.
- SAGPyA. 2001. Proyecto Forestal de Desarrollo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación. Ministerio de Economía (Republica Argentina).
- Searle, S. R. 1971. Linear models. John Wiley & Son, New York. 532 pp.
- Tibbits, W. and Hodge, G. 1998. Genetic parameters and breeding value predictions for *Eucalyptus nitens* wood fiber production traits. *Forest Science* 44(4).
- Torres, J. y Gezan, S. 1998. Índice de selección. En: Mejora Genética Forestal Operativa. Eds.: Ipinza R.; Gutierrez B.; Emhart V. Valdivia, Chile.
- Turnbull, J.W., and Griffing, A.R., 1986. The concept of provenance and its relationship to infraspecific classification in forest trees. In *Infraspecific classification of Wild and Cultivated Plants*. B.T. Styles (Ed.) 157-89. Clarendon, Oxford.
- White, T. L. and Hodge, G.R. 1989. Prediction Breeding Values with Applications in Forest Tree Improvement. Kluwer Academic Publishers. Dordrech, Netherlands. 367pp.

Responsable técnico: Dr. Ing. Ftal. Carlos López -Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).

Integrantes: Dra. Ing. Ftal. Juana Graciela Moglia-Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).
Dr. Ing. Ftal. Luis Fornés- E.E.A. INTA Famaillá
Ing. Ftal. Marcelo Navall- E.E.A. INTA Santiago del Estero
Ing. Ftal. María Gracia Senilliani. Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE)
Ing. Ftal. Cristina Magali Venturini- Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).
Sra. Elba Bravo- Jefe de laboratorio del Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA)- UNSE