

**EVALUACION GENETICA Y ECONOMICA DE DOS
ENSAYOS DE PROGENIE *DE Pinus radiata* D. Don A
BASE DE UN INDICE DE SELECCIÓN MULTICRITERIO**

Torres, Julio

¹Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile. Casilla 9206, Santiago, Chile

INTRODUCCION

Desde el inicio un programa de mejoramiento genético forestal enfrenta el desafío de optimizar la información que arroja, para efectuar una selección eficiente de los mejores genotipos. Esto se dificulta en la primera generación de mejora, debido a que la información de los individuos de la población es puramente visual. Sin embargo, a medida que se avanza en el programa, la información sobre el material genético sí está disponible para crear generaciones avanzadas de árboles selectos. Por lo tanto, es indispensable utilizar metodologías de evaluación más eficientes que la selección masal.

En este contexto, existe diversas metodologías de evaluación para generaciones avanzadas de mejora, que varían en su eficiencia y complejidad estadística. Dentro de la herramientas disponibles, se encuentra el índice de selección multicriterio, que permite una evaluación simultánea de rasgos fenotípicos simplificando a su vez de manera considerable la complejidad en la selección de segunda generación. Además, tiene la ventaja de incluir la componente económica en el análisis, cosa que pocos métodos hacen.

La incorporación por parte de los programas de mejora actualmente en desarrollo, de otras metodologías de evaluación genética, como el índice de selección, debe pasar primero por su aplicación en pruebas genéticas ya evaluadas. Esto con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los métodos actualmente en uso y poder determinar así, la eficiencia real del método. En el caso de este estudio, lo que se buscó fue la aplicación del índice de selección multicriterio a dos pruebas de progenie de pino radiata, y posteriormente comparar los resultados con el método de la mejor predicción lineal insesgada (BLUP, por sus siglas en inglés).

MATERIALES

Localidad

La información para el estudio se obtuvo de dos ensayos de progenie de *Pinus radiata*, establecidos en los años 1980 y 1981 por la Empresa Forestal Tornagaleones, identificados por los códigos TG800105 y TG810105

respectivamente. Los ensayos están localizados en la zona sur del país, en la comuna de Paillaco, provincia de Valdivia, X Región.

Material Genético

Las pruebas TG800105 y TG810105 contienen 23 y 32 familias de polinización abierta respectivamente. La semilla se recolectó de árboles plus seleccionados por la Universidad Austral. En cada una de las pruebas se plantaron 10 familias adicionales para utilizarlas como control; éstas provienen de poblaciones sin mejoramiento y permiten calcular el progreso obtenido en la selección.

Las pruebas fueron establecidas en un diseño en bloques completamente aleatorizados. Para ambos ensayos se midieron las variables de diámetro a la altura del pecho (1.3 metros) en centímetros; altura en metros y rectitud del fuste, evaluada con un puntaje de 1 a 3.

Todos los parámetros genéticos necesarios para el cálculo del índice fueron proporcionados por la empresa.

Evaluación económica

Para la evaluación económica se utilizó un simulador de crecimiento y manejo. En este estudio se contó con el simulador RADIATA3, originado a partir del Proyecto Modelo Nacional de Simulación y Crecimiento de Pino Radiata.

METODO

Objetivo de mejoramiento

Los rasgos incluidos en la evaluación dependen del objetivo de mejoramiento u objetivo de producción, que es considerado el paso más importante en la definición de la estrategia de un programa, ya que entrega la dirección hacia dónde se quiere llegar.

El objetivo de mejoramiento se define como todos los rasgos que afectan la rentabilidad de su proceso productivo, es decir, aquellos que influyen en los ingresos y los costos. Estas características son incluidas luego en el valor genético agregado ponderadas por su valor económico.

De esta forma, el valor genético agregado es (Hazel, 1943):

$$H = a_1G_1 + a_2G_2 + \dots + a_nG_n$$

donde

- a_i = valor económico relativo al i-ésimo rasgo
- G_i = valor genético aditivo del i-ésimo rasgo
- H = valor genético agregado del individuo

Como los factores ambientales y genético no aditivos (efectos de dominancia y epistasis) hacen que el fenotipo del individuo no se parezca al genotipo, para un rasgo cualquiera, los individuos con más alto valor de H no podrán ser reconocidos directamente con exactitud. Por esta razón la selección debe ser practicada indirectamente, utilizando una variable correlacionada basada en el desempeño fenotípico de cada individuo para varios rasgos, además de la información familiar de cada individuo en el caso que se cuente con ella (Smith, 1936; Hazel, 1943).

De acuerdo a esto, la variable correlacionada será el índice de selección:

$$I = b_1P_1 + b_2P_2 + \dots + b_nP_n$$

$$\begin{cases} b_1 \text{Cov}(P_1, P_1) + b_2 \text{Cov}(P_1, P_2) + \dots + b_n \text{Cov}(P_1, P_n) = \text{Cov}(P_1, H) \\ b_2 \text{Cov}(P_2, P_1) + b_2 \text{Cov}(P_2, P_2) + \dots + b_n \text{Cov}(P_2, P_n) = \text{Cov}(P_2, H) \\ b_3 \text{Cov}(P_3, P_1) + b_2 \text{Cov}(P_3, P_2) + \dots + b_n \text{Cov}(P_3, P_n) = \text{Cov}(P_3, H) \\ \dots \\ b_n \text{Cov}(P_n, P_1) + b_2 \text{Cov}(P_n, P_2) + \dots + b_n \text{Cov}(P_n, P_n) = \text{Cov}(P_n, H) \end{cases}$$

Estas son las ecuaciones del índice y pueden ser escritas en notación matricial como:

$$Pb = Ga$$

donde

- b_i = coeficiente de regresión múltiple, que maximiza la correlación entre H e I
- P_i = observación fenotípica del i-ésimo rasgo
- I = valor del índice, en base al cual se realiza la selección

Cálculo del índice

Los coeficientes b_i del índice son calculados para maximizar la correlación entre el índice y el valor genético agregado (r_{IH}). Es decir, que el valor genético predicho sea lo más cercano posible al valor genético verdadero, pero siempre desconocido.

A diferencia de otros métodos más complejos, como la mejor predicción lineal insesgada, el índice de selección calcula un único conjunto de coeficientes b para todos los individuos de la prueba, simplificando de esta manera todo el proceso matemático.

El cálculo de los coeficientes b_i se realiza mediante la resolución del siguiente conjunto de ecuaciones simultáneas (Hazel, 1943):

Es decir:

$$\begin{bmatrix} \text{Cov}(P_1, P_1) + \text{Cov}(P_1, P_2) + \dots + \text{Cov}(P_1, P_n) \\ \text{Cov}(P_2, P_1) + \text{Cov}(P_2, P_2) + \dots + \text{Cov}(P_2, P_n) \\ \text{Cov}(P_3, P_1) + \text{Cov}(P_3, P_2) + \dots + \text{Cov}(P_3, P_n) \\ \dots \\ \text{Cov}(P_n, P_1) + \text{Cov}(P_n, P_2) + \dots + \text{Cov}(P_n, P_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cov}(G_1, G_1) \\ \text{Cov}(G_2, G_2) \\ \text{Cov}(G_3, G_3) \\ \dots \\ \text{Cov}(G_n, G_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix}$$

donde

- P = matriz de varianzas y covarianzas entre las observaciones fenotípicas
- b = vector de coeficientes de la ecuación del índice
- G = matriz de varianzas y covarianzas genéticas
- a = vector de ponderadores económicos

Despejando el vector b se tiene la ecuación final para el cálculo de los coeficientes del índice de selección:

$$b = P^{-1}Ga$$

Para resolver esta ecuación se requieren las heredabilidades en sentido estricto y las desviaciones estándar fenotípicas de los rasgos, además de las correlaciones genéticas y fenotípicas entre rasgos y los valores económicos relativos

Indices de selección

Se construyeron índices de selección integrando información individual y familiar, para los rasgos de altura (en metros), diámetro a la altura del pecho (en centímetros), volumen (en metros cúbicos) y rectitud del fuste (en un puntaje de 1 a 3), usando el programa Restricted Evaluated Selection Index, RESI, desarrollado por Cotterill y Dean (1990). La información familiar correspondió a medias familiares de medios hermanos (familias de polinización abierta).

El objetivo de mejoramiento utilizado fue:

$$H = a_1 g_{ALT} + a_2 g_{DAP} + a_3 g_{REC}$$

donde

- a_i = ponderador económico del rasgo i
- g_i = valor genético aditivo del rasgo i

con el índice de selección construido como

$$I = b_1 P_{ALT} + b_2 F_{ALT} + b_3 P_{DAP} + b_4 F_{DAP} + b_5 P_{REC} + b_6 F_{REC}$$

donde

- b_i = coeficiente de correlación múltiple
- P_i = observación fenotípica individual para i-ésimo rasgo
- F_i = media familiar de medios hermanos para el i-ésimo rasgo

Para este estudio se utilizó en la función H un conjunto de ponderadores económicos basados en el método de la ganancia deseada (Pesek y Baker, 1969).

Evaluación económica

Para la evaluación se realizó una comparación de los individuos seleccionados versus las familias de control, para cada ensayo. La comparación fue hecha en base a proyecciones de crecimiento, las cuales se obtuvieron aplicando el simulador de crecimiento y manejo RADIATA3, el que es capaz de modelar el efecto que distintas opciones de manejo silvícola tienen en el crecimiento y rendimiento de plantaciones de pino radiata.

La evaluación económica de la selección consistió en la actualización de un flujo de caja que contuvo los costos y beneficios que se derivan del establecimiento, crecimiento, manejo silvícola y cosecha de las plantaciones originadas por la propagación operativa de los árboles seleccionados.

La actualización se hizo con una edad de cosecha de 25 años y una tasa de interés anual de 10%, no se consideró el precio del suelo para evaluar solamente el mejor proyecto de plantación. El

resultado de este análisis para ambos ensayos fue comparado con sus respectivos controles, en términos de valor presente neto (US\$/ha) y tasa interna de retorno (%).

RESULTADOS

Comparación entre el índice de selección (IS) y la mejor predicción lineal insesgada (BLUP)

En los Cuadros 1 y 2 se presentan los resultados finales de la jerarquización familiar en base al índice de selección. Los resultados de la mejor predicción lineal insesgada (BLUP), pertenecen a estudios anteriores realizados sobre el mismo material. Las posiciones de cada familia por ambos métodos, ha sido unidas mediante una línea recta, para observar más claramente sus similitudes y diferencias.

Cuadro 1: Jerarquización familiar del ensayo TG800105

N°	BLUP	INDICE DE SELECCION
1	UA0011	UA0011
2	UA0016	UA0014
3	UA0014	UA0016
4	UA0003	UA0017
5	UA0005	UA0003
6	UA0017	TG0004
7	UA0013	UA0013
8	UA0010	UA0010
9	TG0004	UA0004
10	UA0004	UA0007
11	UA0007	UA0005
12	UA0015	UA0026
13	UA0022	UA0002
14	UA0008	UA0015
15	UA0026	UA0025
16	UA0023	UA0023
17	UA0012	UA0012
18	UA0002	UA0024
19	UA0025	TG0003
20	UA0024	UA0008
21	UA0006	UA0006
22	TG0003	UA0022
23	UA0020	UA0020

En este Cuadro se observa claramente una división entre la mitad superior e inferior de la jerarquización, para los dos métodos. Dentro de estas dos divisiones, las familias presentan grandes similitudes, especialmente entre los extremos (superiores e inferiores), en donde ambos métodos presentan las mismas familias

(UA0011 en el extremo superior y UA0020 en el extremo inferior).

La correlación entre las jerarquizaciones finales para los dos métodos es de 0.87, lo que indica el grado de similitud en los resultados.

Cuadro 2: Jerarquización familiar del ensayo TG810105

N°	BLUP	INDICE DE SELECCION
1	UA0011	TG0001
2	TG0001	UA0011
3	UA0013	UA0013
4	TG0003	UA0019
	UA0014	UA0010
6	UA0007	TG0004
7	UA0003	TG0003
8	TG0004	UA0007
9	UA0010	UA0008
10	TG0006	TG0006
11	UA0004	UA0003
12	TG0009	UA0022
13	UA0012	UA0002
14	UA0017	UA0025
15	UA0022	UA0021
16	UA0008	UA0012
17	UA0021	TG0008
18	TG0002	UA0017
19	UA0019	TG0009
20	UA0002	TG0002
21	TG0008	UA0018
22	UA0006	UA0014
3	UA0016	UA0016
24	UA0018	UA0004
25	UA0015	UA0015
26	UA0025	UA0006
27	UA0026	UA0024
28	UA0024	UA0026
29	UA0023	UA0023
30	UA0005	UA0020
31	UA0020	UA0005
32	TG0007	TG0007

En este ensayo la similitud entre las familias es menos evidente, pudiendo deberse a los problemas que presentó la prueba para su evaluación. De todas maneras, es posible observar que los tercios superior e inferior de la jerarquización, para los dos métodos, son muy similares, produciéndose diferencias evidentes sólo en el sector medio. Esto indica que, aun con los problemas de precisión en este ensayo, el comportamiento de las mejores y peores familias sigue siendo claro (especialmente en el tercio inferior).

La correlación entre las jerarquizaciones finales para los dos métodos es de 0.79, y aunque menor al otro ensayo, sigue siendo un valor alto.

Evaluación económica de la selección

De los resultados de la proyección, se puede observar la superioridad del material mejorado genéticamente con respecto a los controles, reflejándose en el volumen final a la edad de rotación (662.7 m³/ha versus 537.2 m³/ha), para un índice de utilización mínimo de 10 cm. Esto corresponde a un 23% de incremento en relación a las familias no mejoradas (Cuadro 3).

Cuadro 3: Ganancia debido a la selección en el ensayo TG800105

	ENSAYO TG800105	CONTROL	INCREMENTO
Volumen(m ³ /ha)	662.8	537.1	23 %
Altura (m ³)	37.02	33.89	9 %
Area basal (m ² /ha)	54.58	49.15	11 %
Arb /ha	300	300	

Además, la producción final de los individuos seleccionados presenta una mayor proporción en las clases diamétricas superiores, esto indica que a una edad de rotación de 25 años, la plantación con material mejorado presentará individuos finales altamente productivos para la característica deseada (DAP, en este caso), fruto de la anterior selección de sus padres.

Los resultados del segundo ensayo son

inferiores en volumen, sin embargo deben ser comparados con respecto a sus controles y no con el otro ensayo, debido a la situación en que se encuentra la prueba. Bajo estas circunstancias, nuevamente el ensayo con material mejorado demuestra una clara superioridad (423.3 m³/ha para los individuos seleccionados versus 335.5 m³/ha de los controles), esto significa un 26% de superioridad gracias al mejoramiento genético (Cuadro 4)

Cuadro 4: Ganancia debido a la selección en el ensayo TG810105

	ENSAYO TG810105	CONTROL	INCREMENTO
Volumen(m ³ /ha)	423	335.5	26 %
Altura (m ³)	30.23	27.99	8 %
Area basal (m ² /ha)	42.06	37.55	11 %
Arb /ha	300	300	

Es importante mencionar que la simulación no considera el mejoramiento genético del material en las ecuaciones de crecimiento, por lo tanto, manifiesta una subestimación del crecimiento real al final de la rotación. Esta situación es compensada parcialmente al ingresar índices de sitio distintos para cada situación, en las variables de estado inicial, lo que representa a su vez diferencias en la simulación de crecimiento.

Los resultados de la proyección son llevados a beneficio económico en los Cuadros 5 y 6, para una estrategia operacional basada en la propagación por polinización abierta (OP). Los distintos valores para cada situación dependen del diámetro del cilindro defectuoso (DOO), esta variable afecta el aprovechamiento de la troza libre de nudos, y por lo tanto, la rentabilidad económica de la cosecha.

Cuadro 5: Ganancia económica de la selección en el ensayo TG800105.

PRECIOS CLEAR	Ensayo		Controles	
	VPN (US\$/ha)	TIR (%)	VPN (US\$/ha)	TIR (%)
DOO = 6"	5832.47	20.85	4115.12	18.83
DOO = 7"	5518.35	20.59	3831.45	18.50
DOO = 8"	4185.15	19.34	2510.82	16.78

Cuadro 6: Ganancia económica de la selección en el ensayo TG810105.

PRECIOS CLEAR	Ensayo		Controles	
	VPN (US\$/ha)	TIR (%)	VPN (US\$/ha)	TIR (%)
DOO = 6"	2542.87	16.91	1627.56	15.13
DOO = 7"	2308.38	16.54	1369.94	14.57
DOO = 8"	745.63	13.05	252.05	11.18

CONCLUSIONES

Los resultados de la jerarquización familiar, a base del índice de selección, entrega resultados prácticamente similares a la metodología de la mejor predicción lineal insesgada (BLUP) utilizada en los mismos ensayos, para las posiciones extremas (las mejores y peores familias), demostrando que es una forma eficiente y computacionalmente menos compleja de analizar pruebas genéticas en programas de segunda generación.

En cuanto a la evaluación económica de la selección, se concluye que la utilización de material mejorado genéticamente, originado a partir de los ensayos de progeñe, en el establecimiento de plantaciones operacionales de pino radiata significa un aumento de los rendimientos finales obtenidos. Estos resultados justifican plenamente la aplicación de técnicas de mejoramiento genético como herramienta silvícola. Esto, cuantificado en volumen por hectárea de plantación a la edad de rotación, significó en este estudio un aumento que fluctuó entre un 23% para el material proveniente del ensayo TG800105 y un 26 % para el material proveniente del ensayo TG810105.

BIBLIOGRAFIA

- Cotterill, P. y Dean, C. 1990. Successful Tree Breeding with Index Selection. CSIRO Publications, Melbourne. 81 pp.
- Dean, C.; Cotterill, P. y Cameron, J. 1983. Genetic parameters and gains expected from multiple trait selection of radiata pine in eastern Victoria. Aust. For. Res. 13, 271 - 278.
- Fundacion Chile: Proyecto Nacional de Simulación de Crecimiento y Manejo de Pino Radiata. Programa RADIATA3. Versión 3.03. Manual de Usuario. Noviembre de 1995.
- Hazel, L. N. 1943. The genetic basis for constructing selection indexes. Genetics 28, 476-490.
- Pesek, J. y Baker, R.J. 1969. Desired improvement in relation to selection indices. Can. J. Plant Sci. 49, 803 - 804.
- Smith, F. 1936. A discriminant function for plant selection. Ann. Eugen. (London) 7, 240-250.
- White, T. y Hodge, G. 1989. Predicting Breeding Values with Applications in Forest Tree Improvement. Forest Sciences Volumen 33. Kluwer Academic Pub. London. pp 367.

