

# Los Bosques de Araucaria en Chile: Manejo Sostenible, el Costo de la Sostenibilidad y las Restricciones Técnicas a su Manejo.

---

F. Modrego<sup>(1)</sup>, O. Melo<sup>(2)</sup> y H. Gilabert<sup>(3)</sup>.

---

## ABSTRACT

**F. Modrego, O. Melo and H. Gilabert. The Araucaria Forests in Chile: Sustained Management, the Cost of Sustainability and Technical Constraints to their Management.** A bioeconomical model was developed to study sustained management of the species *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. The model characterizes its dynamics using transition matrices, which determine the evolution of each diameter class in time. The economic problem was modeled as the maximization of the Land Expected Value (LEV), which allows determining an optimal harvest structure and an optimal length of the cutting cycle under a sustained yield condition. An optimal sustained management was obtained for a cutting cycle of 340 years, with a LEV of 105.791 US\$\*Ha<sup>-1</sup>. Based on this optimal cutting plan, a cost of 35.626 US\$\*Ha<sup>-1</sup> was estimated to impose sustained yields in these forests. The opportunity cost of applying the technical constraints effective at the moment for natural forest under selection harvest to Araucaria stands management was also estimated. This cost was calculated taking as base the optimal sustained management, reaching 64.340 US\$\*Ha<sup>-1</sup>. A remarkable policy implication is the existence of a significant incentive against sustainable management of this species. On the other hand, there is evidence of a high opportunity cost to the potential application of the actual management normative in these forests. Therefore, this cost should be contrasted with the potential environmental and social benefits that the implementation of this normative could generate. This evidence contributes to design policies which improve social welfare, but also that consider the true opportunity cost that face the owners of this resource.

 **Key words:** *Araucaria araucana*, matrix model, forest management.

---

<sup>(1)</sup>Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural - RIMISP. Dirigir correspondencia a: Félix Modrego. Casilla 228-22. Santiago, Chile. Tel.: +56 2 236 4557 Fax: +56 2 236 4558 fmodrego@rimisp.org

<sup>(2)</sup>Departamento de Economía Agraria. Pontificia Universidad Católica de Chile.

<sup>(3)</sup>Departamento de Ciencias Forestales. Pontificia Universidad Católica de Chile.

## INTRODUCCION

Los bosques de Araucaria (*Araucaria araucana* (Mol.) Koch) constituyen uno de los recursos forestales de mayor potencial económico del bosque nativo chileno. Estimaciones realizadas por Laroze y Jones (1999) indican un valor comercial maderable de 994 millones de dólares para los bosques de propiedad privada de la especie, con un stock de volumen total aprovechable de aproximadamente 9,7 millones de m<sup>3</sup> para un horizonte de planificación de 40 años.

El inadecuado manejo al que históricamente han sido sometidos estos bosques, motivó al Estado Chileno a protegerlos mediante una serie de disposiciones legales que impiden su aprovechamiento maderero. En la actualidad se encuentra en vigencia el Decreto Supremo N° 43 del Ministerio de Agricultura, que consagra el carácter de Monumento Natural de la Araucaria, impidiendo su cosecha en todo el territorio nacional. A pesar de lo anterior, existe la percepción que estos bosques pueden ser manejados de forma sustentable de existir los incentivos correctos y un marco institucional que fomente su uso racional.

El objetivo de este trabajo es explorar alternativas de manejo óptimas desde un punto de vista económico, sujetas a una condición de rendimiento sostenido. Para esto se plantea un modelo bioeconómico en el cual se caracteriza la dinámica de la especie utilizando matrices de transición y el problema económico en términos de la maximización del Valor Esperado del Suelo (VES). Se pretende además realizar una estimación del costo de oportunidad asociado al manejo sostenible de estos bosques y el costo de imponer restricciones técnicas a su cosecha, como las actualmente vigentes en Chile para bosques manejados bajo criterios de corta selectivos.

Los antecedentes generados en este trabajo permitirán aportar al diseño de políticas de aprovechamiento del recurso óptimas desde una perspectiva social, pero que también incorporen mecanismos de control, fiscalización y/o compensación de acuerdo al verdadero costo de oportunidad que enfrentan los propietarios del recurso.

## MATERIALES Y METODOS

### Modelo bioeconómico para el manejo de bosques de Araucaria.

Para caracterizar la dinámica de la especie se propone un modelo basado en matrices de transición, el cual supone la agrupación de los árboles en  $n$  clases diamétricas. El estado del rodal en un momento dado del tiempo  $t$  queda descrito por el vector columna de dimensión  $(n \times 1)$   $y_t = [y_{it}]$ , con  $i=1, \dots, n$  donde el elemento  $y_{it}$  representa el número de individuos vivos pertenecientes a la clase diamétrica  $i$  en el momento  $t$ .

Se define la variable  $h_{it}$  como el número de árboles pertenecientes a la clase  $i$  que son cosechados durante el intervalo de tiempo  $(t, t+\theta)$ , lo que permite representar la cosecha total del rodal en un período utilizando el vector  $(n \times 1)$   $h_t = [h_{it}]$ , con  $i=1, \dots, n$ .

Los procesos de mortalidad y crecimiento se modelan utilizando probabilidades de transición. Se define el coeficiente  $a_i$  que representa la probabilidad que un árbol perteneciente a la clase  $i$  que no fue cosechado en el período  $\theta$  siga vivo y perteneciendo a la misma clase en el momento  $t+\theta$ . El coeficiente  $b_i$  representa la probabilidad que un árbol perteneciente a la clase  $i-1$  en el momento  $t$ , pase a formar parte de la clase  $i$  en el momento  $t+\theta$ . Finalmente se define  $m_i$ , como la probabilidad que un árbol perteneciente a la clase  $i$  en el momento  $m$  que no es cosechado, muera en el intervalo  $[t, t+\theta]$ . Este coeficiente se vincula con los anteriores mediante la siguiente relación:  $m_{i=1} = a_i - b_{i+1}$ , para  $i = 1, \dots, n-1$  y  $m_n = 1 - a_n$ .

La regeneración natural del rodal se estima a través de una función de regeneración esperada, que describe el número de árboles que se incorporan a la menor clase diamétrica durante el intervalo de duración  $\theta$ . En este trabajo se probaron diferentes especificaciones para la función de regeneración esperada. La que entregó un modelo de mejores proyecciones respecto a la dinámica de largo plazo descrita para la especie (Veblen, 1982; Burns, 1993), fue la ecuación propuesta por Ralston *et al.* (2003). Según esta especificación la regeneración esperada es una función lineal exclusivamente del área basal residual del rodal. Se define por tanto la siguiente ecuación de regresión para estimar la regeneración esperada:

$$I_t = \beta_0 + \beta_1 ABR_t + \mu_t$$

donde  $I_t$  representa el número esperado de árboles que regeneran en un intervalo de duración  $\theta$ ,  $ABR_t = \sum_{i=1}^n B_i (y_{it} - h_{it})$

representa el área basal residual del rodal con  $B_i$  representando el área basal del árbol de diámetro medio de la clase  $i$ ,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los parámetros de la regresión y  $\mu_t$  representa un término de error estocástico. Los parámetros representan respectivamente, la regeneración máxima en una situación sin área basal residual y el efecto marginal de la densidad sobre la regeneración. Se espera que los signos de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  sean positivo y negativo respectivamente, de forma de permitir un mecanismo de estabilización natural que haga disminuir la regeneración al aumentar la densidad del rodal. Este mecanismo de retroalimentación denso-dependiente permite corregir el problema del crecimiento exponencial en el número de árboles al interior de cada clase que exhibía la formulación original del modelo (Usher, 1966), permitiendo la obtención de esquemas de manejo globalmente óptimos (Buongiorno y Michie, 1980).

Habiendo determinado las probabilidades de mortalidad y transición, es posible modelar la evolución del rodal en el tiempo como un sistema de ecuaciones de diferencia que puede ser expresado matricialmente de la siguiente manera:

$$y_{t+\theta} = G(y_t - h_t) + c \quad (2)$$

En el sistema (2),  $G$  representa la matriz de transición de orden  $(n \times n)$  y  $c$  es un vector columna de regeneración máxima de orden  $(n \times 1)$ , ambos conformados por constantes:

$$G = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & \dots & d_n \\ b_2 & a_2 & & \\ & b_3 & a_3 & \\ & & & \vdots \\ & & & b_n & a_n \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix},$$

donde  $d_i = a_i + \beta_1 B_i$  y  $d_i = \beta_1 B_i$ ,  $i = 2, \dots, n$ .

La ecuación (2) puede generalizarse para proyectar la dinámica de un rodal manejado bajo ciclos de cosecha de  $\theta$  años de duración:

$$y_{t+\gamma\theta} = G^\gamma (y_t - h_t) + \sum_{i=0}^{\gamma-1} G^i c.$$

Una condición de rendimiento sostenido puede lograrse imponiendo simultáneamente una estructura de equilibrio  $y_t = y_{t+\theta} = y^*$ , junto con una cosecha de equilibrio  $h_t = h_{t+\theta} = h^*$  en el sistema (3), lo cual determina un stock de estado estacionario definido por:

$$y^* = G^\gamma (y^* - h^*) + \sum_{i=0}^{\gamma-1} G^i c.$$

La cosecha de equilibrio queda definida de la siguiente manera:

$$h^* = (G^\gamma)^{-1} (G^\gamma - I) y^* + (G^\gamma)^{-1} \sum_{i=0}^{\gamma-1} G^i c.$$

El criterio económico de manejo utilizado en este trabajo es la maximización del valor esperado del suelo (Faustmann, 1842; Chang, 1981), es decir el valor presente de una serie de cosechas ocurridas cada  $\theta$  años a perpetuidad. Suponiendo que la primera cosecha se realiza en el período actual y que el rodal se encuentra en una condición de estado estacionario, es posible plantear el siguiente modelo de decisión:

$$\text{Max}_{(h^*, y^*)} \frac{(v^* h^* - F)}{1 - (1+r)^{-\gamma\theta}}$$

S.A:

$$G^\gamma h^* + (I - G^\gamma) y^* = \sum_{i=0}^{\gamma-1} G^i c$$

$$y^* - h^* \geq 0$$

$$h^* \geq 0,$$

donde  $v = (v_1, \dots, v_n)$  es un vector en el cual el elemento  $v_i$  representa el valor neto de costos variables de cosecha de un árbol de la clase  $i$  (US\$\*árbol<sup>-1</sup>),  $F$  es el costo fijo de cosecha (US\$\*Ha<sup>-1</sup>) y  $r$  representa la tasa de descuento relevante. El valor que toma la función objetivo en el óptimo representa el máximo valor esperado del suelo (VES) en US\$\*Ha<sup>-1</sup> para una longitud de ciclo de cosecha dada. Para mantener la naturaleza lineal del problema de programación matemática (4), éste puede resolverse para distintos valores de  $\gamma$ , de forma de encontrar el ciclo que maximice el valor esperado del suelo.

#### Tratamiento de los datos

En el marco del proyecto CONAF/PNUD/FAO “Estudio de Regeneración del Tipo Forestal Araucaria”, se estableció entre los años 1981 y 1982 una red de parcelas permanentes en bosques mixtos de *Araucaria araucana-Nothofagus pumilio* en la zona de Lonquimay, IX Región de Chile. Las parcelas tienen un tamaño de una hectárea (100 x 100 m) y una separación de 20 m entre sí. Estas parcelas fueron sometidas en el año 1982 a cortas selectivas para el estudio del crecimiento y de la regeneración del bosque bajo distintas intensidades de manejo (Donoso, 1990).

Debido a la imposibilidad de acceder a la información detallada de las mediciones, se simuló el estado inicial de la población de Araucaria y sus procesos de regeneración, crecimiento y muerte para parcelas manejadas bajo tres tratamientos silviculturales.

El método desarrollado simula de forma anual la evolución de un estado inicial por un período de 10 años, de forma de obtener una condición final que permitiera generar la información necesaria para la estimación de los parámetros del modelo. El intervalo de 10 años ( $\theta$ ) fue establecido arbitrariamente de forma de facilitar la definición de un esquema de manejo óptimo en la siguiente etapa de este trabajo.

El algoritmo de simulación desarrollado se encuentra descrito en detalle en Modrego (2005). Sus principales etapas son:

- Generación de parcelas artificiales a partir de tablas de rodal conocidas, utilizando números aleatorios con distribución uniforme.
- Algoritmo estocástico de mortalidad basado en el cálculo de probabilidades anuales de muerte para cada árbol en cada parcela.

- Aplicación de funciones de incremento diamétrico para simular el crecimiento anual de cada árbol en cada parcela.

A partir de 1.000 simulaciones de Monte Carlo para cada parcela se obtuvieron los valores esperados y los errores estándar para los distintos parámetros del modelo, utilizando la metodología propuesta por Michie y Buongiorno (1984).

## RESULTADOS

### Estimación de los coeficientes del modelo

Se construyó un modelo de 19 clases diamétricas de 10 cm. de rango, que van desde un diámetro de 20 a 30 cm., hasta 200 cm. y más. En el Cuadro 1 se reporta las probabilidades calculadas de mortalidad ( $m_i$ ), de permanencia ( $a_i$ ) y de avance ( $b_i$ ) para cada clase, junto con sus respectivos errores estándar.

Se observa en el Cuadro 1 las altas probabilidades de permanencia en una clase ( $a_i$ ), las cuales son consistentes con el lento crecimiento que exhibe la especie ( $< 2,5 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) y el corto intervalo de proyección utilizado (10 años). Esta probabilidad alcanza un mínimo de 0,812 para la primera clase, luego se incrementa hasta un máximo de 0,898 para la clase de 135 cm. y finalmente decrece en las clases superiores. La probabilidad de avance ( $b_i$ ) muestra un comportamiento opuesto al anterior, con

un máximo 0,150 para la clase de 35 cm. y un mínimo de 0,096 para la clase de 145 cm. La probabilidad de muerte tiende a decrecer con el diámetro, desde un máximo de 0,038 para la primera a un mínimo de 0,001 para la última clase. Este comportamiento es concordante con el principio que las tasas de mortalidad tienden a ser mayores en árboles jóvenes o débiles con escaso crecimiento. Finalmente, la tendencia creciente de los errores estándar se debe a la escasa presencia de árboles de grandes dimensiones en los datos originales utilizados para la simulación.

Los resultados de la estimación de la ecuación de regeneración obtenidos por el método de mínimos cuadrados ordinarios se presentan en el Cuadro 2. Cabe señalar que el signo de los coeficientes de la regresión es concordante con lo establecido en el modelo teórico ( $\beta_0 > 0, \beta_1 < 0$ ), lo cual posibilita un mecanismo de feedback denso-dependiente que inhibe la regeneración al aumentar la densidad del rodal.

**Cuadro 1.** Resultados de la estimación y errores estándar de las probabilidades de mortalidad y transición para cada clase diamétrica.

\* indica probabilidades de transición obtenidas por interpolación lineal.

\*\* indica probabilidades de transición extrapoladas utilizando una media móvil de tres clases.

Clase diamétrica (cm.)	$m_i$	Error estándar ( $m_i$ )	$b_i$	Error estándar ( $b_i$ )	$a_i$	Error estándar ( $a_i$ )
25	0,038	0,034	-	-	0,812	0,110
35	0,030	0,043	0,150	0,096	0,827	0,116
45	0,026	0,049	0,142	0,105	0,836	0,126
55	0,022	0,038	0,138	0,115	0,843	0,113
65	0,018	0,051	0,135	0,104	0,856	0,145
75	0,017	0,048	0,126	0,137	0,859	0,128
85	0,014	0,048	0,124	0,120	0,868	0,142
95	0,015	0,089	0,118	0,135	0,873	0,231
105	0,011	0,080	0,112	0,218	0,871	0,262
115	0,015	0,111	0,118	0,252	0,887	0,269
125	0,010	0,076	0,098	0,250	0,889	0,258
135	0,006	0,043	0,101	0,250	0,898	0,167
145	0,008	0,043	0,096	0,163	0,890	0,158
155	0,015	0,111	0,103	0,154	0,876	0,256
165	-	-	0,109	0,236	0,871*	-
175	0,004	0,063	0,120*	-	0,866	0,341
185	-	-	0,130	0,336	0,852*	-
195	-	-	0,120**	-	0,859*	-
205	0,001	0,032	0,123**	-	0,825	0,380

**Cuadro 2.** Resultados de la estimación de la función de regeneración esperada.

Variable	Coefficiente	Error Estándar	Valor p
Área basal residual	-0,479	0,129	< 0,001
intercepto	39,218	0,578	< 0,001
$R^2 = 0,32$		Probabilidad > F = 0,0000	

### *Esquema de cosecha óptimo de rendimiento sostenido*

Se obtuvieron datos de volúmenes aprovechables y valores netos de costos variables de manejo para los árboles pertenecientes a las distintas clases diamétricas de Laroze y Jones (1999). Los valores en US\$ fueron actualizados al año 2004 utilizándose información de la variación del tipo de cambio real entregada por el Banco Central de Chile (2004). El precio neto de la madera de Araucaria calculado de esta manera, asciende a aproximadamente a  $198 \text{ US\$*m}^{3(-1)}$ . Para determinar el costo fijo de cosecha se recopilieron datos de Valdés (1997), obteniéndose un valor actualizado de aproximadamente  $1.544 \text{ US\$*Ha}^{-1}$ . La tasa de interés utilizada fue del 6% siguiendo el criterio de Laroze y Jones (1999).

cha sostenida de  $542,98 \text{ m}^3\text{*Ha}^{-1}$ . Para ciclos de corta mayores a los 340 años, el modelo predice un menor volumen de cosecha sostenida, por lo que este ciclo de cortas óptimo debe interpretarse como el momento crítico en el cual la densidad del bosque impide una suficiente regeneración y por ende el crecimiento se ve superado por los procesos de mortalidad.

Otro elemento importante de la solución óptima es que la primera cosecha es la única relevante en términos económicos. Al alargarse la longitud del ciclo de cosecha, el valor presente de la segunda y posteriores cosechas tiende a cero para cualquier tasa de descuento en el rango relevante para el inversionista privado. Por esta razón, si la primera cosecha es en el período actual, es preferible extraer más madera y postergar futuras cosechas sin valor económico. De esta manera, la imposición de una condición de rendimiento sostenido permite conservar un stock mínimo para la mantención del recurso en el tiempo, stock que sería también cosechado de no imponerse esta condición.

**Cuadro 3.** Volumen del stock de equilibrio, volumen de cosecha y VES para una hectárea de *Araucaria araucana* manejada bajo distintos ciclos de cosecha ( $F = 1.544 \text{ US\$*Ha}^{-1}$ ,  $r = 6\%$ ).

Ciclo de cosecha (años)	Volumen stock ( $\text{m}^3 \cdot \text{Ha}^{-1}$ )	Volumen de cosecha ( $\text{m}^3 \cdot \text{Ha}^{-1}$ )	VES ( $\text{US\$} \cdot \text{Ha}^{-1}$ )
10	210,45	17,11	4.166
20	223,99	34,22	7.585
40	251,01	68,32	13.249
80	304,91	135,69	25.521
120	357,76	201,43	38.309
160	409,15	265,04	50.853
200	413,73	328,94	63.481
240	464,70	391,38	75.823
280	512,57	451,80	87.768
320	529,36	512,92	99.849
340	552,70	542,98	105.791
360	571,17	432,73	83.998
400	601,56	258,45	49.546
440	623,51	209,20	39.810
480	626,99	199,86	37.964
500	635,68	199,65	37.923

*Esquema de cosecha óptimo de rendimiento sostenido sujeto a restricciones técnicas de cosecha*

El Reglamento Técnico del Decreto Ley N°701 actualmente vigente, establece una cosecha máxima del 35% del área basal del rodal para bosques nativos bajo métodos de corta selectivos. Con el fin de evaluar el efecto de una restricción de este tipo sobre el VES y la longitud óptima de cosecha para un rodal promedio de *Araucaria*, se incorpora la siguiente restricción al problema de decisión (4):

$$0,35g'y* \geq g'h*$$

donde  $g=(g_1, \dots, g_n)$  es un vector en que el elemento representa el área basal del árbol de diámetro medio de la clase  $i$ .

En el Cuadro 4 se resume los volúmenes de stock y de cosecha y el VES de rendimiento sostenido para distintos ciclos de corta, restringidos a una cosecha máxima del 35% del área basal total

del stock disponible. Se observa que al imponer una restricción de área basal residual, el ciclo de cosecha óptimo se acorta a 320 años dado que al dejarse rodales residuales más densos, la saturación del bosque se alcanza en un menor periodo de tiempo. Por otra parte, los volúmenes de cosecha sostenible óptimos restringidos son bastante menores respecto de la solución no restringida y el VES disminuye a un valor máximo de 41.451  $US\$*Ha^{-1}$  producto de la nueva restricción.

**Cuadro 4.** Volumen del stock de equilibrio, volumen de cosecha y VES para una hectárea de *Araucaria araucana* manejada bajo distintos ciclos de cosecha y restringidos a una cosecha máxima del 35% del área basal total ( $F = 1.544 \text{ US\$*Ha}^{-1}$ ,  $r = 6\%$ ).

Ciclo de cosecha (años)	Volumen stock ( $m^3*Ha^{-1}$ )	Volumen de cosecha ( $m^3*Ha^{-1}$ )	VES ( $US\$*Ha^{-1}$ )
10	229,13	17,04	4.130
20	261,32	33,62	7.414
40	322,86	64,35	12.380
80	395,74	115,65	21.522
120	458,80	151,76	28.482
160	506,98	175,53	33.158
200	552,17	192,09	36.428
240	583,28	203,50	38.684
280	605,55	211,67	40.299
320	621,92	217,50	41.451
340	622,01	201,40	38.270
360	622,40	188,27	35.674
400	623,83	168,83	31.832
440	625,34	157,44	29.579
480	626,99	150,54	28.214
500	628,90	148,70	27.852

*Estimación del costo asociado a la condición de rendimiento sostenido y del costo de las restricciones técnicas al manejo.*

Habiéndose obtenido un esquema de manejo óptimo sujeto a una condición de rendimiento sostenido, puede estimarse el costo de oportunidad que enfrenta el productor forestal producto de imponer este criterio de sostenibilidad. Adicionalmente, puede estimarse el costo que tendría imponer otro tipo de restricciones técnicas tendientes a asegurar un manejo sustentable en los bosques de Araucaria, como las restricciones de cosecha máxima actualmente vigentes para bosques manejados bajo métodos selectivos.

Dado que se trabajó con soluciones de estado estacionario se obtuvo un stock de equilibrio dinámico para un rodal no intervenido, el cual se considera representativo de una condición promedio para bosques inalterados de la especie. Esta estructura puede obtenerse estableciendo un vector de cosecha nulo en el sistema (2) y despejando el vector de estado estacionario. La estructura de equilibrio dinámico queda definida por la siguiente expresión:

$$y^* = (I - G)^{-1}c.$$

Se estimó el volumen del stock de equilibrio no manejado y el valor de su cosecha total incluyendo la clase diamétrica de regeneración (15 cm.), la cual fue recuperada a partir de los coeficientes calculados y de las proyecciones del modelo. Dado que un óptimo económico no restringido no requiere la conservación del bosque, esta clase de regeneración también es cosechada y la solución óptima queda caracterizada por una única cosecha inicial de todo stock disponible, la cual no está sujeta a descuento intertemporal. El VES obtenido de esta manera asciende por tanto a 141.417 US\$\*Ha<sup>-1</sup>.

El costo estimado para la condición de rendimiento sostenido fue por tanto estimado como la diferencia entre el VES de un manejo no restringido a rendimiento sostenido y el máximo VES de rendimiento sostenido (ciclo de cosecha de 340 años). De esta forma, la imposición de un manejo sujeto a rendimiento sostenido tiene un costo estimado de  $141.417 - 105.791 = 35.626$  US\$\*Ha<sup>-1</sup>, lo cual corresponde aproximadamente a un 25,2% del VES del manejo óptimo no restringido a una condición de sostenibilidad. El valor obtenido corresponde a un valor anual equivalente a perpetuidad de aproximadamente 4.275 US\$\*Ha<sup>-1</sup> considerando la tasa la tasa oficial de descuento del 12% utilizada para la evaluación de proyectos públicos.

Siguiendo el mismo razonamiento anterior, se estimó el costo que tendría la aplicación en bosques de Araucaria de las restricciones de cosecha actualmente vigentes para bosques cosechados bajo métodos selectivos. Este asciende a  $105.791 - 41.451 = 64.340$  US\$\*Ha<sup>-1</sup>, tomando como referencia el óptimo económico no sostenible. Este valor corresponde a

aproximadamente un 60,8% del máximo VES de rendimiento sostenido. En términos de costos anuales equivalentes a perpetuidad, este monto asciende a aproximadamente 7.721 US\$\*Ha<sup>-1</sup> para una tasa de descuento del 12%.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

La evidencia generada sugiere la existencia de un elevado costo de oportunidad del rendimiento sostenido y por ende un considerable incentivo económico contra el manejo sustentable de los bosques de Araucaria por parte de los productores privados. Por otra parte, la obtención de un alto costo de oportunidad de una hipotética aplicación de las restricciones de cosecha vigentes para otras especies nativas, sería un indicio de la posible existencia de alternativas de manejo más eficientes para desarrollar una cosecha sostenible del recurso.

Las estimaciones aquí presentadas pueden servir de base para determinar el monto de medidas compensatorias en beneficio del productor forestal sustentable o para realizar evaluaciones sociales respecto de la relación costo-beneficio de un manejo sostenible de la especie. Al respecto, los resultados obtenidos sugieren que los costos de oportunidad que enfrentaría un productor forestal sustentable de Araucaria se encuentran muy por encima de las 5 a 10 UTM\*Ha<sup>-1</sup> entregadas una única vez, que se contemplan como subsidio a la conservación y el manejo sustentable del bosque nativo en las actuales propuestas de ley. Por esta razón, si se quisiera fomentar la cosecha sostenida de esta especie a través de subsidios, el monto de estos incentivos debiera aumentar considerablemente para compensar el verdadero costo de oportunidad que enfrenta el propietario del recurso.

Otra implicancia importante que se deriva de este trabajo es que el diseño de normativas de manejo para bosques nativos debiera basarse en el conocimiento de la dinámica de estos bosques y no en criterios arbitrarios como los que rigen actualmente. En ese sentido la estrategia correcta debiera ser la definición de criterios de manejo más flexibles, que se adapten las diferentes situaciones ecológicas y productivas existentes en cada situación. Esta redefinición de la normativa puede permitir al productor optimizar sus decisiones de manejo, de forma de alcanzar los estándares de sustentabilidad deseados de manera económicamente eficiente.

En conclusión, la evidencia generada sugiere algunas pautas para el diseño de políticas de aprovechamiento sustentables de los bosques de Araucaria. La existencia de un considerable incentivo económico en contra del manejo sostenible del recurso, hace pensar en la necesidad de instaurar mecanismos regulatorios públicos para la implementación práctica de políticas de aprovechamiento. Las propuestas deberían incorporar en su diseño componentes de incentivo, regulación, y sanción, junto con medidas compensatorias que consideren el verdadero costo de oportunidad que enfrentan

los propietarios de estos bosques.

La implementación de medidas de este tipo puede tener un elevado costo social, que se justificará sólo en la medida que la sociedad asigne un mayor valor a los beneficios derivados de la existencia del recurso. Futuras investigaciones debieran apuntar a la valoración de estos beneficios, de forma de contar con una perspectiva más amplia para el diseño de políticas de aprovechamiento socialmente óptimas.

Finalmente, cabe señalar que los resultados presentados están condicionados por una rígida concepción de rendimiento sostenido, el cual se define a partir de la naturaleza del modelo utilizado. Formulaciones basadas en técnicas de control óptimo u optimización dinámica podrían ayudar a determinar la conveniencia de alcanzar y mantener estructuras de estado estacionario, o de definir trayectorias alternativas para el stock y la cosecha en el tiempo. Bajo esta perspectiva, las conclusiones presentadas podrían variar sustancialmente al incorporarse esquemas de manejo más flexibles.

 **Palabras Clave:** *Araucaria araucana*, modelo matricial, manejo forestal.

## RESUMEN

### **F. Modrego, O. Melo y H. Gilabert. Los Bosques de Araucaria en Chile: Manejo Sostenible, el Costo de la Sostenibilidad y las Restricciones Técnicas a su Manejo.**

Se desarrolló un modelo bioeconómico para estudiar el manejo sustentable de la especie *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. El modelo caracteriza su dinámica utilizando matrices de transición, que determinan el comportamiento de cada clase diamétrica en el tiempo. El problema económico se modeló en términos de la maximización del Valor Esperado del Suelo (VES), lo cual permite determinar una estructura de cosecha y longitud de ciclo de cortas óptimos bajo condición de rendimiento sostenido. Se obtuvo un manejo óptimo sostenido para un ciclo de cosecha de 340 años, con un VES de  $105.791 \text{ US\$*Ha}^{-1}$ . A partir de este manejo se estimó el costo de imponer la condición de sostenibilidad, que asciende a  $35.626 \text{ US\$*Ha}^{-1}$ . Se estimó también el costo de imponer en los bosques de Araucaria las restricciones técnicas vigentes para la cosecha de bosques nativos bajo cosecha selectiva. Este costo fue estimado sobre la base de un manejo óptimo sostenido, alcanzando los  $64.340 \text{ US\$*Ha}^{-1}$ . Como implicancia de política relevante destaca la existencia de un significativo incentivo económico en contra del manejo sustentable de la especie. Por otra parte, se evidencia un alto costo de oportunidad de la potencial aplicación de las actuales normas de manejo en estos bosques, por lo que debieran ser contrastadas con los beneficios ambientales y sociales que su implementación pudiera generar. Estos antecedentes aportan al diseño de políticas que aumenten el bienestar social pero que también consideren mecanismos de control, fiscalización y/o compensación de acuerdo al verdadero costo de oportunidad que enfrentan los propietarios del recurso.

## LITERATURA CITADA

- Banco Central de Chile. 2004. Estadísticas económicas. [http://www.bcentral.cl/esp/infoeconomica/seriesindicadores/index\\_p.htm](http://www.bcentral.cl/esp/infoeconomica/seriesindicadores/index_p.htm)
- Buongiorno, J.; Michie, B. R. 1980. A matrix model of uneven-aged forest management. *Forest Science* 26(4):609-625.
- Burns, B. R. 1993. Fire-induced dynamics of *Araucaria araucana-Nothofagus antarctica* forest in the Southern Andes. *Journal of Biogeography* 20:669-685.
- Chang, 1981. Determination of the optimal growing stock and cutting cycle for an uneven-aged stand. *Forest Science* 27(4):739-744.
- Donoso, S. A. 1990. Crecimiento de *Araucaria araucana* (K. Koch) bajo diversas intensidades de corta. Tesis de Grado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 73 pp.
- Faustmann, M. 1842. Berechnung des werthes, welchen waldboden sowie noch nicht haubare holzbestände für die welwirtschaft besitzen. *Allegemeine Forest und Jagd Zeitung* 25: 441-455.
- Laroze, A., Jones, F. 1999. Evaluación económica de bosques de Araucaria. CONAF. Documento de circulación restringida. 13 pp.
- Michie, B. R.; Buongiorno, J. 1984. Estimation of a matrix model of forest growth from re-measured permanent plots. *Forest Ecology and Management* 8:127-135.
- Modrego, F. 2005. Modelo matricial para el manejo de bosques multietáneos de *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. Tesis de Magíster. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Santiago, Chile. 113 pp.
- Ralston, R.; Buongiorno, J.; Schulte, B.; Fried, J. 2003. Non-linear matrix modelling of forest growth with permanent plot data: The case of uneven-aged Douglas-fir stands. *International Transactions in Operational Research* 10:461-482.
- Usher, M. B. 1966. A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to selection forests. *Journal of Applied Ecology* 3:355-367.
- Valdés, B. 1997. Impacto económico en una empresa privada por cambio en la legislación de *Araucaria araucana* (Mol.) Koch.: Análisis del caso Quinquén. Tesis de Grado. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. Concepción, Chile. 178 pp.
- Veblen, T. T. 1982. Regeneration patterns in *Araucaria araucana* forests in Chile. *Journal of Biogeography* 9(1):11-28.