BOSQUE 19(1): 13-26, 1998 DOI: 10.4206/bosque.1998.v19n1-04

ARTICULOS

Evaluación de diferentes modelos de optimización para la planificación de faenas silvícolas*

Evaluation of different optimisation models to schedule silvicultural operations

ANDRE LAROZE[1], PAULINA PINTO[2], FERNANDO MUÑOZ[3]

[1] Departamento Ciencias Forestales, P. Universidad Católica de Chile. Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. [2] Cochrane 1477, Osorno, Chile. [3] Departamento Manejo Forestal, Gerencia Regional Concepción, Forestal Mininco S.A. Los Canelos 79, San Pedro, Concepción.

SUMMARY

Silvicultural tasks in Chile, due to their seasonal character as well as to their short duration present the highest level of labour instability among forestry activities, causing a continuous renewal of non-specialised workers. To revert this situation, the number of workers required, considering cost and labour stability simultaneously should be determined in advance. The objective of this study was to develop and compare several models that elaborate planning strategies for silvicultural tasks, based on different objective functions and constraint sets. The results obtained indicate that the analysed models contribute to an effective scheduling of a company's silvicultural activities at an operational level.

Key words: operational planning, activity scheduling.

RESUMEN

Actualmente en Chile las faenas forestales con mayor inestabilidad laboral son las intervenciones silvícolas. Debido a su temporalidad y corta duración generan una continua rotación de mano de obra con bajo nivel de especialización. Para aminorar esta situación es necesario dimensionar con la debida anticipación las jornadas requeridas para ejecutar tales actividades, considerando simultáneamente aspectos de costo y estabilidad laboral. El objetivo de este estudio fue desarrollar y comparar diferentes modelos matemáticos para resolver el problema de planificación de las faenas silvícolas de una empresa forestal. Para interpretar adecuadamente las distintas exigencias planteadas por la empresa se formularon modelos con diferentes funciones objetivo y conjuntos de restricciones. Los resultados obtenidos indican que los modelos analizados permiten planificar en forma más eficiente las faenas silvícolas a nivel operativo.

Palabras claves: planificación operativa, programación de actividades.

INTRODUCCION

Actualmente, el sector forestal se destaca como uno de los agentes más dinámicos de la economía chilena que ha logrado la inserción de sus productos en los mercados externos. Sin embargo, en una economía abierta, los factores productivos están en constante cambio y las actividades se tornan cada vez más competitivas y menos rentables. Esta situación ha llevado a las empresas del sector a desarrollar nuevas técnicas que les permitan mejorar la rentabilidad de sus inversiones, mediante el aumento en los rendimientos, la optimización de los sistemas productivos y la minimización tanto de los costos operativos como de administración.

* Proyecto FONDECYT 1960248.

En este contexto, los modelos de optimización permiten encontrar buenas soluciones para problemas de programación de actividades, tales como la selección de esquemas de manejo, la producción de rollizos y la asignación de transporte. Los problemas analizados por las empresas forestales corresponden, principalmente, a cómo invertir eficientemente sus recursos a un nivel de planificación estratégico (Barros y Weintraub 1982, García 1984); y a nivel táctico (Laroze y Greber 1991, Weintraub *et al.* 1994) y operativo (Laroze 1997, Weintraub *et al.* 1989, Weintraub *et al.* 1997); la atención se ha focalizado en aspectos de cosecha, accesibilidad y transporte. Sin embargo, las técnicas de simulación y optimización han sido muy poco utilizadas para resolver problemas relacionados con las actividades silvícolas (Muñoz y Andalaft 1991).

Las faenas silvícolas son las que presentan la mayor inestabilidad laboral dentro del sector forestal nacional y las que emplean obreros con menores niveles de especialización. Esto se debe a la temporalidad y corta duración de este tipo de actividades, lo que conlleva contrataciones por corto plazo y una continua rotación de los trabajadores. Esta situación podría ser revertida al realizar una planificación de las faenas silvícolas que considere simultáneamente aspectos de minimización de costos y de estabilidad laboral; es decir, que mantenga la dotación de trabajadores forestales contratados lo más estable posible, reduciendo las fluctuaciones mensuales que normalmente se experimentan, sin que ello vaya en perjuicio de los costos operacionales. De esta forma, se podrían disminuir los tiempos ociosos de campamentos forestales, aumentar la eficiencia en el uso de los recursos administrativos de la empresa y lograr una mayor estabilidad laboral que estimule la capacitación por parte de los contratistas.

A través de este estudio se desarrollaron modelos de optimización que permiten programar las faenas silvícolas de una empresa forestal para un horizonte de planificación de una temporada. Dado que no existe un modelo probado para resolver este tipo de problema, fue necesario diseñar, evaluar y comparar formulaciones alternativas. Para ello se implementaron distintas funciones objetivo y conjuntos de restricciones, cuyas soluciones se analizaron en términos de costo y estabilidad laboral. De esta manera fue posible determinar qué factores tienen mayor relevancia para el problema, de modo de poder seleccionar un modelo que permita generar soluciones implementables a nivel operativo.

INFORMACION BASICA

Se utilizaron datos de faenas silvícolas proporcionados por el Departamento de Manejo Forestal de la Gerencia Regional Concepción de la empresa Forestal Mininco S.A. Esta información se extrajo del plan operativo para este tipo de actividades correspondiente al año 1995. De los antecedentes proporcionados por la empresa se eligieron 20 predios, con diferentes características, con el fin de tener diversidad de situaciones. Los datos utilizados consisten en superficies, costos, rendimientos y períodos factibles de ejecución para 8 faenas silvícolas. Se consideró un horizonte de planificación de 12 períodos mensuales. En base a esta información se realizaron los diferentes análisis presentados en este estudio.

El número de predios y faenas seleccionados, junto con la duración del horizonte de planificación, corresponden a un problema de tamaño real, representativo de las decisiones que se realizan a nivel de un Distrito (la unidad administrativa básica de la empresa participante en el estudio). El cuadro 1 indica la dimensión de dos problemas, que corresponden a la formulación más simple y la más completa analizada, respectivamente.

MODELAMIENTO DEL PROBLEMA

Basándose en el programa anual establecido para las faenas de manejo, los meses en que es factible realizar las intervenciones, los rendimientos y costos esperados, y el presupuesto disponible, es posible utilizar técnicas de programación matemática para dimensionar eficientemente las jornadas mensuales requeridas para cada faena en cada predio.

Sin embargo, dado que el problema de la planificación de faenas silvícolas no está claramente definido, se evaluaron diferentes modelos, formados a partir de la combinación de distintas funciones objetivo y conjuntos de restricciones. Así fue posible analizar múltiples escenarios y comparar las soluciones óptimas correspondientes a cada formulación.

CUADRO 1

Caracterización de dos problemas de optimización.
Characterization of two optimization problems.

Criterio	Problema A	Problema B
Función objetivo	Minimizar costo total	Minimizar costo total
Tipo de restricciones	Cumplimiento de faenas (A)	Cumplimiento de faenas (A) Rango de jornadas (R) Fluctuación máxima (F) Superficie mínima y máxima (S) Condición de continuidad (C)
Número de variables	364	1456
Número de variables enteras	0	1092
Número de restricciones	100	1354
Coeficientes distintos de cero	3213	10195

A continuación se presenta la nomenclatura utilizada para representar las distintas funciones objetivo y restricciones consideradas. Posteriormente, se presentan las características de tales funciones objetivo y restricciones.

NOMENCLATURA

Subíndices:

i = Predio (i = 1, ..., I)
j = Faena (j = 1, ..., J)
k = Período (k = 1, ..., K)

Variables de decisión:

X_{ijk} = Variable continua que indica la superficie intervenida en el predio **i**, faena **j** durante el período **k** *(ha);*

H_{ijk} = Variable binaria que indica la ejecución de la faena **j** en el predio **i** durante el período **k** *(condición inicial:* $H_{ij0} = 0$, *condición final:* $H_{ijk+1} = 0$*);*

Y^s_{ijk} = Variable binaria que indica el inicio de la faena **j** en el predio **i** durante el período **k** *(condición final:* $Y^s_{ijk+1} = 0$*);*

Y^f_{ijk} = Variable binaria que indica el cierre de la faena **j** en el predio **i** durante el período **k**.

Variables auxiliares:

N_k = Variable de contabilidad que indica el número de jornadas requeridas para todas las faenas a ejecutar durante el período **k**.

Parámetros de las faenas:

F_{ijk} Coeficiente binario que indica la factibilidad de realizar la faena **j** del predio **i** durante el período **k**;

R_{ijk} = Rendimiento de la faena **j** en el predio **i** durante el período **k** *(jornadas/ha);*

C_{ijk} Costo de realizar la faena **j** en el predio **i** durante el período **k** *($/ha);*

C^s_{ijk} Costo de iniciar la faena **j** en el predio **i** durante el período **k** *($)*;

C^{f}_{ijk} = Costo de cerrar la faena j en el predio i durante el período k *($)*.

Parámetros de las restricciones:

S_{ij} = Superficie de la faena j que debe ser realizada en el predio i *(ha);*

α_j = Superficie mensual mínima para la ejecución de la faena j en un predio *(ha);*

β_j = Superficie mensual máxima para la ejecución de la faena j en un predio *(ha);*

δ_k = Fluctuación permitida en el número de jornadas entre períodos consecutivos (%);

Min_k = Mínima cantidad de jornadas a contratar durante el período **k**;

Max_k = Máxima cantidad de jornadas a contratar para realizar faenas en el período k;

CT = Máximo costo total permitido durante la temporada ($);

λ = Constante utilizada para efectos de establecer la continuidad de las faenas.

FUNCIONES OBJETIVO

A continuación se describen las diferentes funciones objetivo diseñadas para el problema en cuestión.

Minimización del costo total: Mediante esta función objetivo se busca encontrar la solución que minimiza el costo operacional necesario para realizar las intervenciones silvícolas.

$$\text{Minimizar} \quad \Sigma_i \, \Sigma_j \, \Sigma_k \, (F_{ijk}{*}C_{ijk}){*}X_{ijk}$$

Minimización del número de jornadas: Esta función objetivo genera la solución que minimiza el número de jornadas requeridas para ejecutar la totalidad de las faenas silvícolas.

$$\text{Minimizar} \quad \Sigma_i \, \Sigma_j \, \Sigma_k \, (F_{ijk}{*}R_{ijk}){*}X_{ijk}$$

Minimización de la varianza del número de jornadas: Con esta función objetivo se pretende minimizar la varianza en el número de jornadas contratadas para cada período. Esta función objetivo es equivalente a maximizar la estabilidad laboral.

$$\text{Minimizar} \quad \Sigma_k \, \{[\Sigma_i \, \Sigma_j \, (F_{ijk}{*}R_{ijk}){*}X_{ijk}] - J_m\}^1$$

Minimización de la dotación mensual máxima (DMM): Con esta función objetivo se busca minimizar aquel período que presenta los mayores requerimientos de mano de obra. Así, en forma indirecta, se trata de reducir el número total de trabajadores de la temporada y uniformar la asignación de jornadas en los distintos períodos. Esta función objetivo se acompaña de restricciones que aseguran una diferencia positiva entre el valor objetivo y el número de jornadas contratadas en cada período de la temporada.

Minimizar Z

$$\text{Sujeto a:} \quad Z - \Sigma_i \, \Sigma_j \, (F_{ijk}{*}R_{ijk}){*}X_{ijk} \;\geq\; 0 \quad \forall_k$$

RESTRICCIONES

Las siguientes restricciones fueron diseñadas para formular diferentes modelos que representan el problema de la planificación de faenas silvícolas.

Restricción de cumplimiento de faenas (A): Obliga a la solución a realizar el programa anual preestablecido para las faenas de cada predio, por lo cual se implementa en todos los modelos.

$$\Sigma_k \, F_{ijk}{*}X_{ijk} \;=\; S_{ij} \quad \forall_{i,j}$$

Restricciones de rango de jornadas (R): Fuerzan la solución a asignar mensualmente, considerando todas las faenas en los diferentes predios, un número de jornadas que no exceda un límite superior ni sea menor a un valor mínimo de jornadas totales. Estas restricciones permiten regular la dotación de trabajadores en términos absolutos.

$$\Sigma_i \, \Sigma_j \, (F_{ijk}{*}R_{ijk}){*}X_{ijk} \;\leq\; Max_k \quad \forall_k$$
(jornadas máximas por período)

$$\Sigma_i \, \Sigma_j \, (F_{ijk}{*}R_{ijk}){*}X_{ijk} \;\geq\; Min_k \quad \forall_k$$
(jornadas mínimas por período)

[1] J_m corresponde a la dotación mensual promedio $\{[\Sigma_i \, \Sigma_j \, \Sigma_k \, (F_{ijk}{*}R_{ijk}){*}X_{ijk}]/n\}$; donde *n* representa el número de períodos de la temporada.

Restricciones de fluctuación porcentual de jornadas (F): Fuerzan la solución a que las diferencias relativas, en la dotación de trabajadores entre meses consecutivos, no exceda un porcentaje predeterminado.

$$\Sigma_i \Sigma_j (F_{ijk}*R_{ijk})*X_{ijk} - N_k = 0 \quad \forall_k$$
(ecuación de contabilidad)

$$N_k - (1 + \delta_k/100)*N_{k-1} \leq 0 \quad (k = 2, ..., K)$$
(máximo incremento porcentual)

$$N_k - (1 - \delta_k/100)*N_{k-1} \geq 0 \quad (k = 2, ..., K)$$
(máxima disminución porcentual)

Restricciones de superficie mínima y máxima (S): Fuerzan a que las faenas a realizar tengan al menos una extensión mínima, que corresponde a un límite práctico para que su ejecución sea conveniente, y no excedan una extensión máxima, que corresponde a un límite de control operativo.

$$X_{ijk} - \alpha_j*H_{ijk} \geq 0 \quad \forall_{i,j,k}$$

$$X_{ijk} - \beta_j*H_{ijk} \leq 0 \quad \forall_{i,j,k}$$

Condición de continuidad (C): Favorece a que las faenas sean realizadas sin interrupción, para lo cual se asocia un costo a cada inicio y término de faena. Si los costos asignados son suficientemente altos las condiciones de continuidad se transforman en restricciones implícitas[2].

$$X_{ijk} - \lambda*H_{ijk} \geq 0 \quad \forall_{i,j,k}$$

$$X_{ijk} - \beta_j*H_{ijk} \leq 0 \quad \forall_{i,j,k}$$

$$(H_{ijk} - H_{ijk-1}) + (Y^f_{ijk} - Y^s_{ijk}) = 0 \quad \forall_{i,j,k\ (k=1, ..., K+1)}$$

Restricción de costo total máximo (P): Restringe la solución a no exceder un presupuesto total disponible para realizar el conjunto de faenas en los diferentes predios.

$$\Sigma_i \Sigma_j \Sigma_k (F_{ijk}*C_{ijk})*X_{ijk} \leq CT$$

Restricciones de no negatividad: Fuerzan a que las variables de decisión sean siempre positivas, ya que éstas determinan la superficie asignada a las faenas.

$$X_{ijk} \geq 0 \quad \forall_{i,j,k}$$

Restricción de variables binarias: Garantiza que las variables de decisión utilizadas para representar condiciones de estado sólo puedan tomar valores 0 ó 1 (inactivas y activas, respectivamente).

$$H_{ijk}, Y^s_{ijk}, Y^f_{ijk} \in \{0 , 1\} \quad \forall_{i,j,k\ (k=1, ..., K+1)}$$

PARAMETROS BASE UTILIZADOS PARA LAS RESTRICCIONES

El cuadro 2 presenta los valores base correspondientes a las distintas restricciones consideradas para el problema. En el caso de la fluctuación permitida en el número jornadas contratadas en meses consecutivos, se acepta una variación máxima de ± 10%. En el caso del número de jornadas a contratar mensualmente, el valor mínimo se fijó en 5850 y el máximo en 7150 jornadas para todos los períodos. Estos valores corresponden, aproximadamente, a una variación del 10% con respecto al número promedio de jornadas contratadas por mes (6517), según la solución del modelo de minimización de la varianza sujeto al cumplimiento del plan operativo de faenas. En este cuadro también se indica, para cada faena, el tamaño mensual mínimo y máximo que puede tener una intervención silvícola si es que ésta se realiza en un predio. Además, se indica la constante utilizada para efectos de determinar la condición de continuidad, 0.1 ha, y el costo total máximo utilizado como referencia (USD 1675525). Este último valor corresponde a la solución del modelo de minimización del costo total sujeto al cumplimiento del programa de faenas.

2 Al incluir la condición de continuidad se incluyen los costos que implican la apertura y cierre de faenas en la función objetivo de minimización de costos y en la restricción de costo total máximo. El componente correspondiente a la apertura y cierre de faenas es el siguiente:

$$[\Sigma_i \Sigma_j \Sigma_k (C^s_{ijk}*Y^s_{ijk} + C^f_{ijk}*Y^f_{ijk})] + (C^f_{ijK+1}* Y^f_{ijK+1})$$

CUADRO 2

Parámetros base utilizados para las restricciones.
Base parameters used for restrictions.

Mes	Rango de jornadas		Fluctuación permitida [%]	
	Mínimo	Máximo	(-)	(+)
1	5850	7150		
2	5850	7150	10	10
3	5850	7150	10	10
4	5850	7150	10	10
5	5850	7150	10	10
6	5850	7150	10	10
7	5850	7150	10	10
8	5850	7150	10	10
9	5850	7150	10	10
10	5850	7150	10	10
11	5850	7150	10	10
12	5850	7150	10	10

Faena	Superficie [ha]	
	Mínima	Máxima
A	15	85
B	15	100
C	20	80
D	20	100
E	10	150
F	25	225
G	25	225
H	20	250

Constante de continuidad [ha]: 0.1
Costo total máximo [USD]: 1675525

RESULTADOS

Es posible definir una gran cantidad de modelos diferentes como resultado de la combinación de distintas funciones objetivo con diversos conjuntos de restricciones. Sin embargo, para efectos de este estudio, el análisis se concentró en los problemas que se describen a continuación.

COMPARACION DE FUNCIONES OBJETIVO

Este análisis se realizó para comparar el comportamiento de los cuatro modelos básicos, que consisten en cada una de las funciones objetivo considerando sólo la restricción del cumplimiento de las intervenciones silvícolas de acuerdo al plan operativo de la empresa. Posteriormente, tales soluciones se confrontan con aquellas que resultan de incluir una limitante adicional que regula la superficie mensual mínima y máxima de las faenas. De esta manera se puede evaluar el efecto que tienen estas restricciones, en términos de costo y jornadas, según el tipo de función objetivo.

Con respecto al análisis de los modelos básicos, los resultados del cuadro 3 indican que la función objetivo de minimización del costo total, siendo la más eficiente en términos económicos, presenta una gran variación mensual tanto en el presupuesto como en el número de jornadas contratadas. La función objetivo de minimización de jornadas también genera una alta inestabilidad operativa y, aun cuando obtiene un mejor rendimiento promedio, produce un aumento en el costo total. Esta situación se debe a que los períodos de mejor rendimiento físico en las faenas no necesariamente coinciden con menores costos operacionales (por ejemplo: plantaciones). Al comparar ambas soluciones se observa un incremento de 3.6% con respecto al costo total (de miles-USD 1676 a 1736) y una disminución de 3.5% en el número de jornadas requeridas (de 76490 a 73793).

La figura 1 presenta la distribución mensual de jornadas correspondiente a la solución obtenida para cada uno de los modelos básicos. Se observa que las funciones objetivo de minimización de la dotación mensual máxima y de minimización de la varianza en el número de jornadas generan una distribución homogénea de trabajo durante todo el año. Sin embargo, esta mayor estabilidad laboral implica un importante incremento en los costos, situación que es más grave en el caso de la minimización de la varianza. En particular, esta

CUADRO 3

Comparación de funciones objetivo.
Comparison of objective functions.

Análisis		Costo [miles-USD]		Jornadas		Proceso de solución	
Minimizar:	Sujeto a:	Total	CV [%]	Total	CV [%]	Iteraciones	Tiempo
Costo total	A	1676	87.2	76490	94.3	1	00:00:01
Jornadas totales	A	1736	91.6	73793	92.9	1	00:00:01
Dotación mensual máxima	A	1794	13.5	77088	6.6	221	00:00:08
Varianza jornadas	A	1822	11.9	78208	0.5	220	00:02:02
Costo total	A, S	1709	48.7	78405	58.4	954	00:00:32
Jornadas totales	A, S	1759	49.4	75915	48.3	991	00:00:34
Dotación mensual máxima	A, S	1816	16.3	78403	15.1	26802	00:08:14
Varianza jornadas	A, S	1825	14.1	78519	8.5	250000	24:10:53

Nota: A = Cumplimiento de faenas; S = Superficie mensual mínima y máxima por faena-predio.
(Parámetros base)

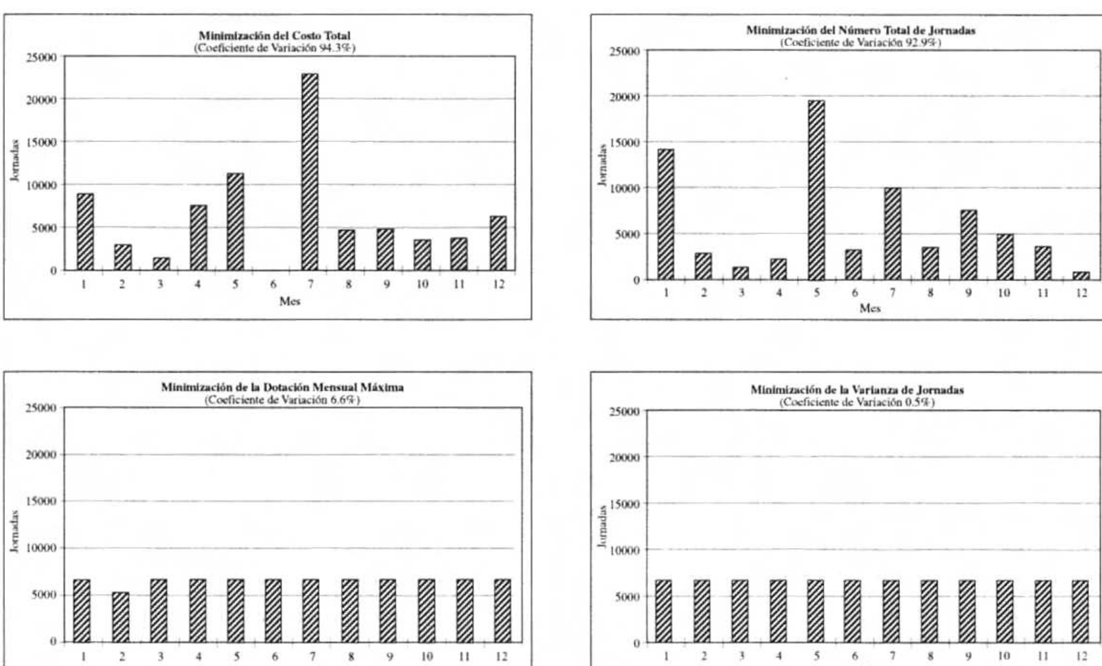

Figura 1. Distribución mensual de jornadas según función objetivo seleccionada.
Monthly workforce distribution according to the selected objective function.

última función objetivo, que es insensible al costo y número total de jornadas, logra la mayor estabilidad laboral mediante una asignación ineficiente de faenas: para nivelar el número de jornadas en los meses de menor actividad recurre a las intervenciones con peores rendimientos. Por consiguiente, esta solución implica un incremento del 8.7% en los costos y de 5.4% en las jornadas, en relación con las obtenidas mediante las funciones objetivo de minimización del costo total y de las jornadas, respectivamente.

Al analizar las soluciones a nivel de predio, se observó que las funciones objetivo de minimización de costos y jornadas concentran la realización de cada faena sólo en el mes en que es más conveniente, lo que implica, en varios casos, exceder la capacidad de gestión real de los contratistas. Por el contrario, las funciones objetivo de minimización de la DMM y minimización de la varianza generan soluciones que implican niveles de actividad mensual muy bajos en algunos predios, que no justifican mantener una faena abierta. Por consiguiente, se agregó una restricción que limita la superficie mensual mínima y máxima que debe tener una faena en un predio. Los resultados del cuadro 3 muestran que esta restricción adicional implica un aumento importante de los costos operacionales en el caso de las funciones objetivo de minimización de costos y jornadas, pero también reduce la variabilidad en los niveles de actividad mensual. En el caso de las otras dos funciones objetivo, el efecto de la nueva restricción tuvo un impacto menor en los costos pero produjo un deterioro en la estabilidad laboral.

El tiempo de solución es mínimo para todos los modelos básicos, incluyendo el de minimización de la varianza que es el único no-lineal (programación cuadrática). Con respecto a los problemas con variables enteras, se produjo un incremento significativo en el número de iteraciones en el caso de minimización de la DMM, pero el tiempo de solución no superó los 10 minutos en un computador Pentium Intel-166Mhz. Sin embargo, en el problema de minimización de la varianza, por tratarse de un modelo no-lineal entero, el tiempo de computación sobrepasó las 24 horas, aun cuando se utilizó como punto inicial la solución correspondiente al modelo de minimización de la DMM. Por consiguiente, se seleccionó la mejor solución factible obtenida dentro de un límite de 250.000 iteraciones.

EFECTO DEL NIVEL DE EXIGENCIA

Para la función objetivo de minimización del costo total se formularon modelos con tres tipos de restricciones: cumplimiento de faenas, rango de jornadas y fluctuación máxima. En este caso, el análisis consistió en definir diversos niveles de exigencia para los dos últimos tipos de restricciones, donde cada nivel de exigencia corresponde a un determinado valor para los parámetros asociados a las restricciones. Estas pruebas permiten conocer el efecto que tienen, en los costos y rendimientos, los distintos requerimientos de distribución de jornadas planteados en el problema.

Los resultados del cuadro 4 indican que mediante la restricción que limita la fluctuación permitida en el número de jornadas entre períodos consecutivos es posible lograr un nivel de actividad considerablemente más parejo al utilizar la función objetivo de minimización del costo total. Sin embargo, se observa que los cambios en el número de jornadas presentan una tendencia en el tiempo, y así la diferencia acumulada en un lapso de 6 meses es cercana al 35% en el caso de una fluctuación tolerada del 10% (4555, 7336 y 5374 jornadas para los meses 1, 6 y 12, respectivamente).

Definir un número máximo de jornadas a contratar por período también mejora la distribución laboral, pero no se evitan algunos meses de muy baja actividad, lo que es suficiente para generar rotación en la mano de obra. Al considerar un número mínimo de jornadas se soluciona el problema anterior, pero se tiende a concentrar una gran cantidad de trabajo durante el mes más favorable, no siendo realista esperar contar con obreros especializados por un tiempo tan breve. Una mejor solución, desde el punto de vista de la estabilidad laboral, se obtuvo al restringir tanto el número mínimo como el máximo de jornadas, generando así sólo dos niveles de actividad durante el año, cada nivel correspondiendo a un límite del rango.

Al considerar simultáneamente las restricciones de rango de jornadas y fluctuación máxima se obtiene una solución que no excede ningún límite crítico y permite una transición gradual entre los dos principales niveles de actividad que ocurren durante la temporada. Además, esta formulación es más efectiva ya que produce una menor variación de jornadas que cualquiera de las restricciones consideradas en forma independiente, sin incurrir en un mayor costo total.

CUADRO 4

Efecto del nivel de exigencia.
Effect of restriction levels.

Análisis		Distribución mensual de jornadas														Costo
Minimizar:	Sujeto a:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total	CV [%]	[miles-USD]
Costo total	A	8710	2800	1335	7413	11095	0	22688	4590	4838	3093	3675	6255	76490	94.3	1676
Costo total	A, F_1	4097	4712	5418	6231	7166	8241	9477	8055	6847	5820	4947	5689	76700	25.2	1707
Costo total	A, F_B	4555	5011	5512	6063	6669	7336	8070	8191	7372	6634	5971	5374	76757	18.5	1717
Costo total	A, F_2	5318	5584	5863	6157	6464	6788	7127	7483	7109	6754	6416	6095	77160	10.2	1738
Costo total	A, R_1	7150	4360	1529	7150	7150	7150	7150	7150	7150	7150	7150	6255	76494	27.2	1718
Costo total	A, R_2	5850	5850	5850	5850	5850	5850	6022	13233	5850	5850	5850	5850	77755	32.8	1728
Costo total	A, R_B	5850	5850	5850	5850	7150	7150	7150	7150	7150	6131	5850	5850	76981	10.2	1737
Costo total	A, F_B, R_B	5850	5850	5850	6435	7079	7150	7150	7150	6770	6093	5850	5850	77077	9.3	1738

Nota: A = Cumplimiento de faenas; F = Fluctuación mensual máxima; R = Rango de jornadas.
(F_B = 10%, F_1 = 15%, F_2 = 5%; R_B = 5850 - 7150 J, $R_1 \leq 7150$ J, $R_2 \geq 5850$ J).

Finalmente, como era de esperar, mientras más exigentes son las condiciones planteadas para el problema mayor es la estabilidad laboral obtenida y más uniforme el rendimiento promedio de las faenas, pero también son mayores los costos operacionales.

EFECTO DEL TIPO DE RESTRICCIONES

Para la función objetivo de minimización de costos totales se definieron varias alternativas de restricciones. En cada formulación se consideraron nuevas restricciones a partir de la condición básica. Primero se incluyó la restricción que limita la fluctuación en el número de jornadas, posteriormente, se agregó la del rango de jornadas, y así hasta llegar al conjunto completo de restricciones relevantes para el problema de minimización de costos.

Los resultados presentados en el cuadro 5 muestran cómo se contraponen los intereses económicos con los de estabilidad laboral y operativa, mediante el incremento del costo total a medida que aumentan las restricciones del problema. Por ejemplo, se puede constatar que limitar el rango de jornadas tiene un mayor impacto en el costo que la restricción de fluctuación, pero también un mayor efecto homogeneizador en la distribución de jornadas. Además, se observa que agregar la restricción de fluctuación a la de rango de jornadas tiene un impacto mínimo en el costo, pero interesante en la estabilidad laboral.

Al considerar simultáneamente las restricciones de superficie mínima y máxima y la condición de continuidad es posible evitar una serie de dificultades operativas, pero el costo total incrementa en un 3.2%. Si a tales restricciones se les agregan las de rango y fluctuación, el costo total aumenta un 8.5% con respecto al modelo básico de minimización de costos (de miles-USD 1676 a 1818), mientras que el coeficiente de variación en el número de jornadas contratadas durante el año disminuye de 94.3% a 9.2%.

Con respecto al tiempo de solución correspondiente a cada modelo, los resultados indican que al considerar el conjunto completo de restricciones se produce un problema combinatorial difícil de resolver, producto principalmente del conflicto entre la condición de continuidad y las restricciones relacionadas con la distribución de jornadas (rango y fluctuación máxima). Esta situación derivó en que no fue posible encontrar una solución óptima en menos de 2.5 millones de iteraciones, equivalente a aproximadamente 12 horas de computación. Sin embargo, si se hubiera considerado una tolerancia de 3.5% con respecto al límite teórico, se habría encontrado una buena solución en cerca de 30 mil iteraciones. Todas las otras formulaciones del problema tuvieron un tiempo de solución inferior a 20 minutos.

ANALISIS TRANSACCIONAL COSTO-ESTABILIDAD LABORAL

Se resolvió el problema de minimización de la varianza del número de jornadas considerando distintos niveles para el máximo costo total permitido. El cuadro 6 presenta los principales resultados correspondientes a este análisis y la figura 2 presenta la curva generada a partir de tales resultados.

Este tipo de formulación del problema define la mejor estabilidad laboral que es posible lograr sin exceder un determinado presupuesto para la realización de todas las faenas. Por ejemplo, se observa que para un presupuesto de miles-USD 1790, se obtiene un variación de 1.2%, la que es inferior a la variación de 6.6% correspondiente a la solución de minimización de la DMM con un costo de miles-USD 1794 (cuadro 3). En el caso de minimización del costo total sujeto a restricciones de rango y fluctuación, la variación en el número de jornadas es de 9.2% con costo de miles-USD 1738 (cuadro 4). Con el mismo presupuesto, al minimizar la varianza se obtiene un coeficiente de variación de 8.5%, el que aumenta a 11.4% cuando el máximo costo total permitido se reduce a miles-USD 1730.

La curva que se genera al considerar distintos niveles de presupuesto corresponde a los puntos de transacción más eficientes en términos del aumento del costo requerido para obtener una mayor estabilidad laboral, a partir de una determinada situación. En el caso analizado en este estudio, la curva muestra que la transacción costo-estabilidad es relativamente favorable al aspecto laboral hasta un costo de miles-USD 1730, pero que de ese punto en adelante una mayor estabilidad se logra sólo con importantes aumentos en el costo total.

GENERACION DE SOLUCIONES DOMINANTES

Se analizaron dos tipos de problemas para las funciones objetivo de minimización de la varianza

CUADRO 5

Efecto del tipo de restricciones.

Effect of type of constraints.

Análisis Minimizar:	Sujeto a:	Resultados mensuales 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Resumen Total	CV [%]	Número iteraciones
Costo [miles-USD]																
Costo total	A	208	79	39	182	270	0	444	81	104	80	70	119	1676	87.2	1
Costo total	A, F	109	117	153	154	160	178	161	163	154	150	116	103	1717	17.4	259
Costo total	A, R	133	141	162	149	170	174	155	134	156	132	119	111	1737	13.6	194
Costo total	A, F, R	133	141	162	161	168	174	161	129	149	133	118	111	1738	14.1	212
Costo total	A, S	124	91	94	125	205	108	231	311	93	108	108	109	1709	48.7	954
Costo total	A, S, C	83	112	98	91	196	96	307	294	75	125	141	112	1729	55.3	20316
Costo total	A, S, F	104	125	148	157	165	167	172	165	165	148	125	110	1753	16.3	54162
Costo total	A, S, R	133	141	155	182	172	176	149	137	165	126	123	120	1780	14.6	13844
Costo total	A, S, F, R	134	142	157	172	175	190	142	139	171	134	122	127	1806	14.6	16265
Costo total	A, S, C, F, R	135	132	163	175	175	185	141	139	176	140	120	138	1818	14.4	2500000
Jornadas [J]																
Costo total	A	8710	2800	1335	7413	11095	0	22688	4590	4838	3093	3675	6255	76490	94.3	
Costo total	A, F	4555	5011	5512	6063	6669	7336	8070	8191	7372	6634	5971	5374	76757	18.5	
Costo total	A, R	5850	5850	5850	5850	7150	7150	7150	7150	7150	6131	5850	5850	76981	10.2	
Costo total	A, F, R	5850	5850	5850	6435	7079	7150	7150	7150	6770	6093	5850	5850	77077	9.3	
Costo total	A, S	5160	3688	3323	4640	8560	5123	11430	16345	4363	4895	5400	5480	78405	58.4	
Costo total	A, S, C	3333	4290	3753	3313	7993	4430	14630	15550	3643	5345	6895	5590	78763	64.6	
Costo total	A, S, F	4602	5062	5569	6125	6738	7412	8153	8429	7586	6827	6145	5530	78177	18.7	
Costo total	A, S, R	5850	5850	5850	7150	7150	7150	7150	7150	7150	5999	5850	5850	78149	10.2	
Costo total	A, S, F, R	5850	5850	6077	6685	7150	7150	7150	7150	7150	6435	5850	5850	78346	9.2	
Costo total	A, S, C, F, R	5850	5850	6149	6764	7150	7150	7150	7150	7150	6435	5850	5850	78498	9.2	

Nota: A = Cumplimiento de faenas; F = Fluctuación mensual máxima; R = Rango de jornadas; S = Superficie mensual mínima y máxima por faena-predio; C = Condición de continuidad.
(Parámetros base)

CUADRO 6

Análisis transactional costo-estabilidad laboral.
Trade-off analysis cost-labor stability.

Análisis		Costo [miles-USD]			Jornadas		
Minimizar:	Sujeto a:	Total	Rango	CV [%]	Total	Rango	CV [%]
Varianza jornadas	A	1821	58	11.9	78208	65	0.5
Varianza jornadas	A, P_1	1790	58	12.7	77861	168	1.2
Varianza jornadas	A, P_2	1760	62	12.8	77003	467	3.1
Varianza jornadas	A, P_3	1730	63	12.8	76917	2067	11.4
Varianza jornadas	A, P_4	1700	90	22.6	76586	4374	24.8
Varianza jornadas	A, P_B	1676	209	50.7	76875	11271	59.7

Nota: A = Cumplimiento de faenas; P = Costo total máximo.
(PB = 1676 miles-USD, P_1 = 1790 miles-USD, P_2 = 1760 miles-USD, P_3 = 1730 miles-USD, P_4 = 1700 miles-USD).

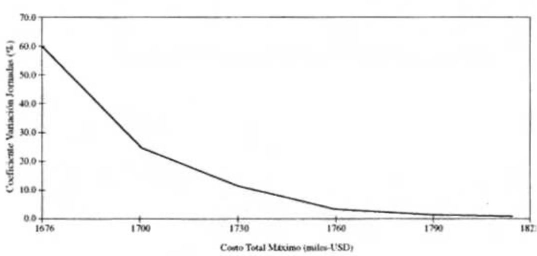

Figura 2. Curva transaccional costo-estabilidad laboral.
Trade-off curve cost-labor stability.

y DMM: el primero considera sólo el cumplimiento del plan de faenas y el segundo incorpora además restricciones de superficie mensual mínima y máxima por faena-predio. Para ambos problemas se incluyó una restricción adicional que limita el costo total permitido para la solución, utilizando como presupuesto de referencia el valor obtenido al minimizar el costo sujeto al mismo tipo de restricciones.

Los resultados del cuadro 7 indican que es posible mejorar la estabilidad laboral sin aumentar los costos operativos. En el caso de los modelos sin restricciones de superficie mínima y máxima, el coeficiente de variación disminuye de un 94.3% a un 67.0% para la función objetivo de minimización de la DMM y a un 59.7% para la de minimización de la varianza. Para los problemas que consideran las restricciones de superficie, las ganancias en términos de estabilidad laboral son menores debido a que tales restricciones tienen por sí mismas un efecto regulador en el caso de la minimización del costo total. Sin embargo, dado que el presupuesto operativo es mayor, existe también una mayor latitud para que las funciones objetivo de minimización de la varianza y de la DMM puedan encontrar una solución más estable laboralmente, pasando de un coeficiente de variación del 59.7% al 48.5% y del 67.0% al 53.5%, respectivamente.

Dado el mismo límite presupuestario, la mejor respuesta en términos de estabilidad laboral se logra con el modelo de minimización de la varianza. Sin embargo, se debe tener presente que se trata de una función objetivo de tipo cuadrática y que al considerar variables enteras se transforma en un problema de difícil solución. La función objetivo de minimización de la DMM, en cambio, corresponde a un modelo tipo Min-Max, de naturaleza lineal, que permite obtener soluciones en un tiempo considerablemente menor, sobre todo si aumenta el tamaño del problema.

El proceso de optimización utilizado genera soluciones dominantes, en el sentido de que tienden a maximizar la estabilidad laboral sin aumentar el costo total. Al resolver el problema de minimización del costo total se obtiene la solución económicamente más conveniente, y al utilizar el valor resultante como restricción presupuestaria en modelos orientados a homogeneizar la distribución del trabajo, es posible obtener la mejor solución final desde la perspectiva de conjugar dos intereses en conflicto.

CUADRO 7

Generación de soluciones dominantes.
Generation of dominant solutions.

Análisis		Costo [miles-USD]				Jornadas			
Minimizar:	Sujeto a:	Total	Mínimo	Máximo	CV [%]	Total	Mínimo	Máximo	CV [%]
Costo total	A	1676	0	444	87.2	76490	0	22688	94.3
DMM	A, P_B	1676	39	278	60.9	76903	1335	13604	67.0
Varianza jomadas	A, P_B	1676	63	272	50.7	76875	2333	13604	59.7
Costo total	A, S	1709	91	311	48.7	78405	3323	16345	58.4
DMM	A, S, P_S	1709	62	255	46.5	77863	2148	12869	53.5
Varianza jomadas	A, S, P_S	1709	94	258	40.1	78287	3323	12863	48.5

Nota: A = Cumplimiento de faenas; P = Costo total máximo; S = Superficie mensual mínima y máxima por faena-predio. (P_B = 1676 miles-USD, P_S = 1709 miles-USD).

CONCLUSIONES

Los modelos planteados para los diferentes análisis realizados destacan cómo el problema de la programación de las faenas silvícolas puede ser formulado de múltiples maneras, según los objetivos y prioridades considerados al momento de planificar las actividades.

En tal sentido, la función objetivo de minimización del costo total prioriza los intereses económicos, pero mediante restricciones de rango de jornadas y fluctuación máxima es posible mejorar significativamente la estabilidad laboral. El mejor resultado se logra combinando ambas restricciones, ya que la segunda sólo controla la variación entre meses consecutivos pero no evita las fluctuaciones acumuladas a través de la temporada. Esta situación se corrige al restringir en términos absolutos el número mínimo y máximo de jornadas a contratar en cualquier período.

Mediante la función objetivo que minimiza la varianza se obtiene la mejor distribución en cuanto a las jornadas requeridas en la temporada, aunque para lograrlo el modelo realiza una mala asignación en términos del rendimiento de las faenas, que lleva a mayores costos operacionales. La función objetivo de minimización de la DMM también tiende a uniformar la distribución de jornadas, con la ventaja de tratarse de un modelo lineal que requiere de un menor tiempo de solución. Además, tiende a generar una menor demanda de mano de obra y por consiguiente un menor costo total. Sin embargo, esta función objetivo se torna indiferente a la distribución de jornadas en el tiempo una vez que no es posible reducir la dotación requerida para un determinado mes y, por lo tanto, es poco efectiva cuando hay niveles de actividad muy diferentes durante el año.

Los resultados del estudio muestran cómo se contraponen los intereses económicos con los de estabilidad laboral y operativa. Por consiguiente, es necesario comparar diferentes formulaciones para lograr una solución que compatibilice los distintos objetivos de la empresa. En particular, la generación de soluciones dominantes representa una buena opción para conjugar los intereses en conflicto, al permitir mejorar la estabilidad laboral sin incrementar el costo total.

En general, mediante el tipo análisis realizado en este estudio es posible determinar el efecto que tienen en la solución del problema tanto la función objetivo utilizada como las distintas exigencias consideradas. Además, permiten al profesional encargado de planificar las faenas silvícolas evaluar el costo adicional que implica satisfacer los diversos requerimientos de la empresa. De ahí la importancia de aplicar técnicas de programación matemática para planificar en forma eficiente las faenas silvícolas a nivel operativo.

AGRADECIMIENTOS

Fue posible realizar este estudio gracias a la cooperación de CONICYT, a través del proyecto FONDECYT 1960248, y a Forestal Mininco S.A. que colaboró en la definición del problema y facilitó la información requerida.

BIBLIOGRAFIA

BARROS, O., A. WEINTRAUB. 1982. Planning for a vertically integrated forest industry. Operations Research 30: 1168-1183.

GARCIA, O. 1984. FOLPI, a forestry oriented linear programming interpreter, p. 293-305 *in* Proceedings IUFRO Symposium on Forest Management Planning and Managerial Economics. University of Tokyo, Japan.

LAROZE, A. 1997. Sistema Maxben 2.1. Manual del Usuario. Forestal Mininco S.A.

LAROZE, A., B. GREBER. 1991. Multi-level harvest planning and log merchandising using goal programming, p. 24-30 *in* Proceedings of the 1991 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report SE-74. Southeastern Forest Experiment Station, Charleston, SC.

MUÑOZ, F., A, ANDALAFT. 1991. Programación de faenas de manejo usando técnicas de optimización, p. 259-267 *en* Actas II Simposio de Economía Forestal en Chile. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

WEINTRAUB, A., R. EPSTEIN, J. SERON, P. TRAVERSO. 1989. Asignador de camiones ASICAM: Implementación y experiencias. Actas II Taller de Producción Forestal, Fundación Chile, Concepción, Chile.

WEINTRAUB, A., A. MAGENDZO, A. WAINER. 1994. Un sistema de decisión de cosecha y acceso: OPTIMED. Actas IV Taller de Producción Forestal, Fundación Chile, Concepción, Chile.

WEINTRAUB, A., R. EPSTEIN, E. NIETO, P. CHEVALIER, J. GABARRO. 1997. OPTICORT 2: Una herramienta para la cosecha de bosques. Actas VII Taller de Producción Forestal, Fundación Chile, Concepción, Chile.

Recibido: 28.03.97