

EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y ALGORITMOS HEURÍSTICOS COMO HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN EN BOSQUE PRIMARIO DE LA PATAGONIA

Simón Moreira-Muñoz¹
Paulo Moreno Meynard²

RESUMEN

La Undécima Región de Chile presenta una serie de características que dificultan su desarrollo forestal. Entre ellas se pueden mencionar bajos rendimientos de madera aserrable de primera calidad e infraestructura deficiente, sin una red caminera adecuada. El alto costo de inversión en habilitación, sumado a una baja tasa de rendimiento, se traduce en un negocio de mucho riesgo y baja rentabilidad.

Este trabajo detalla la metodología desarrollada para lograr la planificación de una faena forestal en los bosques de lenga. El objetivo general es encontrar la secuencia de cosecha que permita al propietario maximizar su beneficio, bajo un cierto escenario. Esto se traduce en la decisión de cuándo, dónde, cómo y cuánto intervenir, para satisfacer a niveles aceptables los objetivos de manejo de un bosque o patrimonio. Para ello se usó la Evaluación Multicriterio en la definición de las variables críticas que determinan decisiones de manejo, y en una segunda etapa, el programa Network2000, que utiliza un algoritmo heurístico asociado a un problema de redes, para abordar la planificación cuando no se cuenta con una infraestructura vial adecuada ni el patrimonio tiene una edad de cosecha establecida. Los principales resultados de este trabajo incluyen la determinación de variables de decisión, una zonificación del patrimonio según objetivos, la selección de la ruta óptima desde cada nodo de origen hasta el destino final, los costos variables de transporte correspondientes a cada origen, los costos variables fijos y totales para cada unidad de oferta, el costo promedio y el volumen que pasará por cada segmento de camino anualmente, el año de habilitación de los caminos y los beneficios totales del plan de cosecha.

SUMMARY

The XI Region of Chile has characteristics that make forest development difficult. These include abundant area of native forest but with low saw-log yields, and a deficient road infrastructure. The main roads have a low quality standard and most of the secondary roads do not exist yet. With a high investment for accessing the forest, together with a low yield of quality logs creates a high risk business with low profit.

The main objective of this work was to search for practical tools and alternatives that allow the owner to satisfies his harvest requirements in the medium-term under environmental restrictions by answering when, where, how, and how much can be harvested. Multi-criteria analysis was used in a first stage to find the key variables, which will guide management objectives. In a second stage the software Network2000 was used to build and solve a network-transportation problem when the absence of a road infrastructure can result in an infeasible project, because of economical restrictions. The main results include the definition of some key environmental variables and their spatial distribution and a GIS database of the forest to facilitate the planning process as decision support system. On the operational side, an analysis of the potential roads, the connection of the harvest units to a sawmill, with variable cost, fixed cost, total cost, and volume per section of road and harvest unit is presented as solution. The timing of the different investments and the total profit of the scenarios is also present.

¹ Instituto Forestal, Chile, smoreira@interchange.ubc.ca

² Instituto Forestal, Chile, pmoreno@infor.cl

INTRODUCCIÓN

La Región de Aysén está incorporada a la Ley Austral (N° 19.606), que da facultad al Ministerio de Bienes Nacionales de entregar concesiones onerosas de terrenos fiscales a largo plazo, para el desarrollo de proyectos específicos (Diario Oficial de la República de Chile, 1999). Esto significa una oportunidad para la Undécima Región, que presenta gran parte de sus terrenos fiscales con potencial de desarrollo forestal y un patrimonio constituido principalmente por bosque primario del tipo forestal lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl. Krasser)).

El concepto de sustentabilidad debería estar detrás de cualquier iniciativa de producción y especial énfasis merece su cumplimiento en lo que es patrimonio estatal, donde el Estado debe velar por los requerimientos de la sociedad, reconociendo la multifuncionalidad del bosque y sus beneficiarios. El propietario puede tener múltiples objetivos, y consecuentemente existe la necesidad de una planificación forestal y herramientas de decisión de mayor complejidad para satisfacer dichas necesidades (Kangas *et al.*, 2006). Schmoldt *et al.* (2001) plantean que muchas veces los objetivos de manejo son mutuamente inconsistentes o que no pueden ser plenamente alcanzados, debido a limitaciones prácticas de espacio y tiempo. A esto se suma que el tomador de decisiones debe actuar en un entorno incierto, donde no dispone de la información apropiada cualitativa y cuantitativamente para describir, prescribir o predecir determinísticamente o numéricamente un sistema, su comportamiento u otra característica (Zimmermann, 2000). Con el apoyo de la Evaluación Multicriterio (EMC) se pueden identificar y jerarquizar los factores que guían esta decisión.

Por otro lado, la programación lineal es la mejor técnica para abordar problemas de planificación de secuencias de cosecha forestal. Pero el aumento de los objetivos y los requerimientos espaciales, como restricciones de adyacencia e inclusión de infraestructura de caminos, han incrementado el tamaño y la dificultad de los problemas, limitando el uso de esta programación por restricciones de tiempo y capacidad computacional. Además, su uso requiere un alto nivel de experiencia, principalmente en la formulación de las matrices e interpretación de los resultados. Ello ha dado pie a otras técnicas, como los algoritmos heurísticos y la simulación, con soluciones más prácticas desde el punto de vista del usuario, que si bien pueden no ser óptimas, son mejores que las que podría llegar a evaluar una persona por sí sola.

En el caso de los bosques primarios de lenga, existe información sobre su dinámica y economía. Grandes esfuerzos se han realizado en zonas más australes de Chile y Argentina en relación con la dinámica sucesional del bosque, la respuesta al manejo y la determinación de funciones de rodal y de crecimiento (Schmidt *et al.*, 1992; Martínez Pastur *et al.*, 2002). Esta información es necesaria, pero no suficiente; su aumento permitirá un mejor desarrollo de la industria forestal vinculada al recurso.

Nuestro trabajo se centró en dos ejes: primero, en determinar variables que podrían definir distintas respuestas del bosque, aplicando un determinado esquema de manejo y para lo cual se utilizó la Evaluación Multicriterio. Como segundo eje se realizó una exploración de las potencialidades y la proyección del negocio forestal, con la ayuda de herramientas prácticas de planificación que se adapten a las condiciones de información existentes.

OBJETIVOS

- Determinar las variables que definirán la zonificación del patrimonio y establecer objetivos de manejo.

- Realizar un análisis económico de la cosecha del patrimonio, considerando restricciones de manejo, costos de inversión y operación, flujos requeridos y su horizonte de planificación.

ANTECEDENTES GENERALES

El patrimonio está caracterizado por un bosque primario del tipo forestal lenga y una composición mixta de lenga y coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oerst.) hacia las zonas más húmedas y bajas del valle. En términos comerciales tiene bajas tasas de aprovechamiento en madera aserrable, pero un mercado importante a nivel nacional e internacional dentro de las maderas nobles. La estructura del bosque se presenta en forma de mosaico (con 1 ó 2 estratos verticales) y el desarrollo es homogéneo en pequeñas superficies de no más de 5.000 m². Hay una mezcla de estados de desarrollo, sanidad y rendimiento.

La Evaluación Multicriterio (EMC) es una herramienta que ayuda a el o los tomadores de decisiones a organizar y sintetizar la información de un modo que les permita sentirse cómodos y confiados sobre la decisión tomada, minimizando el potencial de rechazo posterior, ya que todos los factores o criterios fueron debidamente considerados (Belton & Stewart, 2001). La identificación de las variables relevantes es una parte del proceso, pero la determinación de la importancia relativa (o peso) de cada una de ellas es un gran desafío para el desarrollo de escenarios (Maness & Farell, 2004). Una revisión reciente fue hecha por Mendoza y Martins (2006) sobre el uso de la evaluación o decisión multicriterio y sus aplicaciones en el sector forestal. Dadas sus características y flexibilidad, la EMC tiene un amplio espectro de utilización, y “el juicio de expertos” es un buen método para la determinación de estos criterios y su importancia relativa.

La solución más adecuada para problemas de planificación está en las técnicas exactas. La ventaja de las técnicas exactas, como programación entera o programación dinámica, es que su solución es óptima, pero su desventaja es que presentan limitaciones de tiempo y de capacidad computacional (Nelson, 2003). Es así como surgen los algoritmos heurísticos, definidos como una “técnica que busca buenas soluciones (ceranas al óptimo) a un costo computacional razonable, pero sin poder garantizar factibilidad ni optimalidad, o incluso, en muchos casos ni siquiera definir cuán cerca se encuentra una solución particular del óptimo” (Reeves, 1993). En el mercado existe una serie de programas computacionales de diversa complejidad que abordan temas de caminos dentro de la planificación forestal, en diferentes grados de detalle y con distintas técnicas de solución, como por ejemplo Planex (Epstein *et al.*, 2001) y FPS-ATLAS (Nelson, 2003). Debido a que son complejos y a los requerimientos de información, no siempre sirven a todos los usuarios o tipos de problema. En bosques primarios de avanzado estado de desarrollo y sanidad variable, la edad de cosecha no es un buen indicador para determinar una secuencia de corta, ya que cada cantón está disponible, dependiendo de su accesibilidad, desde el principio hasta el fin del horizonte de planificación. Esto se traduce en que el acceso es la principal variable de interés, y la inversión en infraestructura vial y los respectivos flujos de capital son factores determinantes. Bajo lo anterior, la planificación debe considerar los costos de inversión en infraestructura: un análisis de transporte o de redes que considera costos fijos y costos variables es el algoritmo heurístico propuesto por Sessions (1987). Éste calcula el costo mínimo de la red usando un algoritmo de ruta crítica para resolver el problema de costo variable. La primera iteración minimiza los costos variables e ignora los fijos. Los costos fijos se introducen en el problema de costos variables, reasignando los variables al final de cada iteración. Es decir, se transforman los costos fijos en costos variables equivalentes. La solución considera múltiples períodos de tiempo, convirtiendo el problema de mínimo costo a máximo valor neto presente. El algoritmo heurístico se resuelve con el uso del programa computacional Network2000 (Chung & Sessions, 2003). Este algoritmo incluye el tipo de problema llamado *shortest path* (camino más corto) y dos algoritmos probabilísticos: *simulated annealing* (Kirkpatrick *et al.*, 1983) y *great deluge* (Dueck, 1993). Muchos trabajos vinculados al sector forestal, desde su primera aplicación al rubro hecha por Lockwood y Moore (1993) han aparecido, y también

muchos esfuerzos por analizar el desempeño de los distintos algoritmos para cada tipo de problema (Boston & Bettinger, 1999; Bettinger *et al.*, 2002; Crowe & Nelson, 2005; Pukkala & Kurttila, 2005). Finalmente, Network2000, o previas versiones, ha sido empleado en otros trabajos chilenos, en los que se aplicó un análisis de redes para estudiar problemas de caminos y cosecha forestal: Gayoso *et al.* (1995), Gayoso (1997), Gayoso *et al.* (1991), Gayoso e Iroumé (1993), Gayoso y Muñoz (2000).

MATERIAL Y MÉTODO

Área de estudio: el patrimonio se localiza en la zona del río Ibáñez y río Cajón, en la provincia del General Carrera, Undécima Región de Chile, entre las latitudes sur 45° 55' – 46° 12' y longitudes oeste 72° 26' – 72° 57'. La altitud varía entre los 500 y 1.500 msnm. El predio tiene una superficie de 27.190 ha, de las cuales 15.250 ha corresponden a bosque potencialmente productivo, una vez descontada la superficie con restricciones ambientales, legales y otras condiciones vegetacionales. Este potencial está referido a la producción de madera aserrada de lenga, y en forma secundaria a coihue de Magallanes. No se cuenta con infraestructura vial dentro del predio y es deficiente para acceder a él. El horizonte de planificación es de 30 años, dividido en 15 períodos de 2 años, por lo que corresponde a una planificación de tipo táctica (Nelson, 2001) y sus rendimientos anuales fueron establecidos según las expectativas productivas de la empresa. El problema se dividió en cuatro etapas: las primeras dos, abordan el objetivo uno, y las siguientes dos, el segundo objetivo. La etapa uno fue la definición de objetivos y criterios de zonificación. En una segunda etapa se aplicaron estos criterios para realizar la zonificación del patrimonio y determinar su representación espacial. En la tercera etapa se formuló el problema de redes con el levantamiento de toda la información, y se calcularon los respectivos costos, para, en una última etapa, aplicar esta información y definir la metodología que determina la programación de las cosechas en el tiempo (en la tercera y cuarta etapas se utilizó Network2000 y su algoritmo heurístico).

Definición de criterios de zonificación: basada en los antecedentes de terreno recolectados (variables dendrométricas y dasométricas, tanto cualitativas como descriptivas) y la recopilación bibliográfica, se elaboró una descripción del escenario. Dicho escenario fue sometido al juicio de expertos y con estos resultados se definieron los criterios de zonificación. Una vez establecidas las variables se procedió a especificar los indicadores y pesos relativos que permitieran dar cuenta de su representación superficial. Este proceso fue realizado bajo el concepto de la Evaluación Multicriterio (EMC), definiendo los criterios que determinan que un esquema de manejo pueda o no ser aplicado a una unidad específica. Finalmente, con los criterios se construyó una matriz de evaluación en la que se integran y definen las unidades de gestión, denominadas cuarteles.

Aplicación de la zonificación y construcción de polígonos: identificados los criterios y sus variables, se generaron e intersectaron los respectivos mapas para obtener un único valor a nivel de polígono, que definió su objetivo general de manejo. Todo el análisis y proceso de cartografía digital se realizó utilizando sistemas de información geográfica (SIG) y el programa ArcView3.2. Para efectos de simplificación, concluido este proceso se agruparon los polígonos adyacentes con igual objetivo, procurando formar unidades homogéneas de manejo a un tamaño adecuado para facilitar la gestión operativa (entre 5 y 40 ha). Dicho conjunto de polígonos bajo un mismo esquema de manejo se llamó cantón. Cada cantón cuenta con superficie, objetivo principal y parámetros dasométricos, como volumen y volumen aserrable. Estas unidades fueron la base para la aplicación del análisis económico realizado en las etapas siguientes.

Configuración del modelo y cálculo de costos: el problema de transporte se dibuja como una red de arcos y nodos, donde cada nodo representa la oferta de volumen, un destino o un punto de camino, y los arcos la conexión de cada nodo en la red. El programa considera la extracción de todo el patrimonio en el año que se le asigne, calculando los costos unitarios con el total del volumen asignado

para ese año, e incluye una tasa de interés anual. Las variables de entrada que necesita el programa se distribuyen en dos tablas (Chung & Sessions, 2000). Una con todos los nodos que aportan volumen, el nodo de destino final, su volumen y año de cosecha (la variable de decisión es el año). La segunda tabla detalla la red de arcos que permite la extracción del volumen establecido, con los costos fijos y variables por unidad que signifique el movimiento a través de ese arco. Cada tramo o arco de camino habilita directamente en forma total o parcial uno o más cantones, y por ese camino también podrán ser evacuados volúmenes provenientes de los arcos superiores. Por eso no se pueden asignar costos de cosecha u operación que no sean de transporte a un arco de camino, ya que lo cargará a cada m^3 que pase por él y son costos que deben ser cargados una sola vez. Como solución se creó un nodo ficticio para unir el nodo de oferta con el nodo de la red vial que lo evacua. La ventaja de este método es que permite independizar los nodos y arcos que componen la red vial de los nodos y arcos que componen las ofertas.

La cobertura superficial de cada camino y el volumen a extraer se establecieron en función del equipo de maderero, la pendiente y sus respectivas distancias máximas de maderero. Se asumió que una vez cosechada una superficie, ésta quedaría automáticamente condicionada a un ciclo de corta específico, por lo que los sucesivos años de intervención quedaron en función de esta primera corta. Además se asumió que el volumen aserrable sería distribuido proporcionalmente respecto de la intensidad de corta según zonificación, que no cambiaría a lo largo del horizonte de planificación, por el estado avanzado de desarrollo del bosque. Se consideró un ciclo de corta de 20 años y se estableció un nodo “centro de oferta” por cada tramo de camino (un centro de oferta se define como la superficie y el volumen de los cantones adyacentes que un camino habilita de manera directa). Este proceso está resumido en las Figuras 1a y 1b.

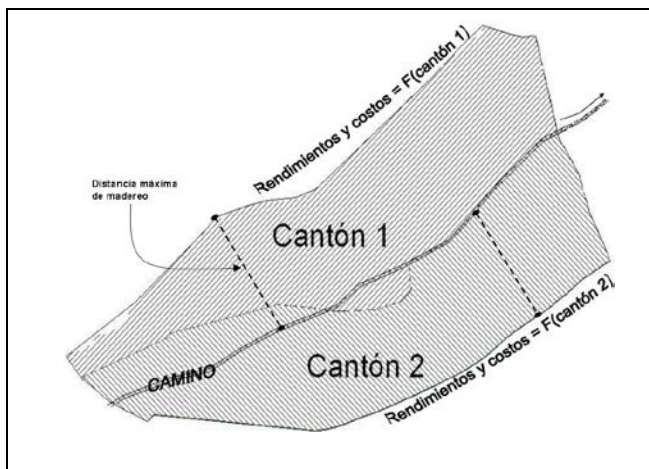


Figura 1a. La construcción del centro de oferta asociado al respectivo camino se hace en función de rendimientos y costos ponderados por la superficie de cada uno de los cantones que lo constituyen.

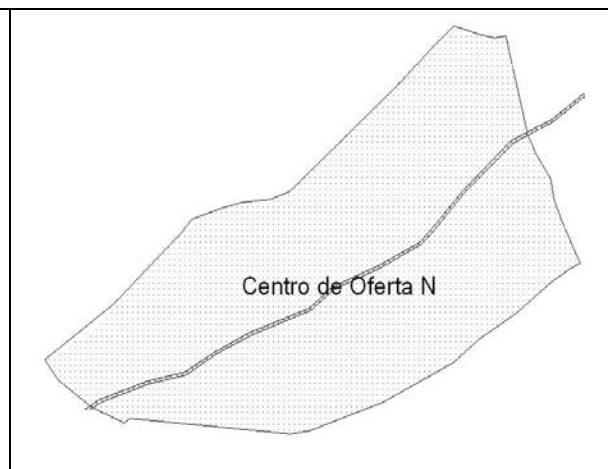


Figura 1b. Volumen y costos de cosecha ingresan al modelo vinculados al centro de oferta, previamente relacionado con sus respectivos cantones.

Para el cálculo de los costos se utilizó el volumen disponible con resolución a la hectárea. El volumen total se ajustó según parámetros de sanidad, y se obtuvo el volumen aserrable de lenga por cantón. Estos rendimientos en relación al volumen total coinciden con los antecedentes bibliográficos presentados por Schmidt y Urzúa (1982), citados por Loewe *et al.* (1997), que estiman que entre el 10 y 20% de las existencias del bosque se extrae como volumen aserrable. La red vial se construyó en una etapa previa utilizando el método del paso, con apoyo de mapas del Instituto Geográfico Militar (IGM), a escala 1:50.000, y fotografías aéreas. La cartografía se complementó con los resultados del inventario, y dirigió el trazado del camino en función de los principales sectores productivos, los equipos de maderero disponibles y sus respectivas distancias máximas de maderero. Se consideró dos estándares de camino: de ripio para camiones de mayor tonelaje y de plataforma para camiones de tonelaje intermedio. Estos

costos se incluyen en la tabla de arcos, como costos fijos de la red vial planificada. No se consideraron los de mantención, debido a que éstos se asumen dentro de los costos de madereo. Se consideró madereo con torres, *skidder* huinche y yunta de bueyes, con sus respectivas características (Cuadro 1). Se calculó un promedio ponderado de costos de madereo por centro de oferta y se asignaron como costos variables.

Cuadro 1. Descripción de los equipos de madereo y sus características.

Equipo	Distancia máxima (m)	Pendiente (%)	Observaciones
Torre	300	> 40% pendiente abajo	Bajo línea de camino
<i>Skidder</i> huinche	200	< 20%	
Yunta de bueyes	150	> 40% pendiente arriba	Sobre línea de camino

Dentro de los costos también se consideró el flete, con un traslado en camión de tonelaje intermedio desde orilla de camino hasta una cancha de acopio, y un segundo flete realizado por camiones de mayor tonelaje para movilizar las trozas al destino final. Este costo se cargó a los arcos que componen la red vial, como costos variables. Finalmente, se consideraron las respectivas cargas y descargas y el costo de volteo con motoseristas, que se incluyen también en los costos variables de los centros de oferta.

Programación de la secuencia de cosecha: una vez calculados los costos unitarios por centro de oferta se procedió a determinar la secuencia de cosecha en función del menor costo, seleccionando los centros de oferta hasta cumplir con los requerimientos volumétricos establecidos. Así sucesivamente cada período, para agregar la tasa de interés en una etapa final y obtener el valor presente neto del proyecto (VPN) y el desglose de los costos unitarios por bienio y centro de oferta.

RESULTADOS

Objetivo uno: determinar las variables que definirán la zonificación del patrimonio y configuración de cantones

Se caracterizó el recurso en función de parámetros físicos, no silvícolas. Se definieron cuatro cuarteles con distintas intensidades de corta aplicadas sobre el bosque potencialmente productivo. Factores como flora y fauna, aunque relevantes, no siempre derivan en una zonificación del patrimonio o en la definición de objetivos, ya que ocurren de manera transversal; se pueden reflejar en políticas de manejo sin tener una representación superficial explícita. Las cortas sucesivas o de protección son el esquema de manejo que se recomienda aplicar para este tipo forestal (Schmidt & Urzúa, 1982; Loewe *et al.*, 1997). Con ello se favorece la regeneración y se satisfacen otros objetivos, como minimización del impacto visual y protección de flora y fauna. Los cuarteles definidos fueron:

- Producción sin restricciones (PROD)
- Producción con limitaciones y restricciones moderadas (PCL1)
- Producción con limitaciones y restricciones estrictas (PCL2)
- Protección o preservación (PROT)

El juicio de expertos determinó cuatro criterios en la representación territorial de los cuarteles:

- Sensibilidad a la erosión
- Pendiente
- Fragilidad por efecto de la nieve y heladas (reflejada en la altitud)
- Viento

La sensibilidad a la erosión fue configurada como una variable compuesta por cinco subvariables con distintos pesos relativos (CONAF-ONF, 1997): pendiente (35%), exposición (25%), geomorfología (15%), tipo de suelo (15%) y profundidad de ceniza (10%); esta última se incluyó debido a que es una zona sensible a la actividad volcánica. Con los cuatro criterios se construyó la matriz de evaluación, en la que se integran para definir los distintos cuarteles (Cuadro 2). Por lo tanto, cada polígono quedó asociado a un objetivo y a los criterios que lo definen (Figura 2).

Cuadro 2. Determinación de criterios y su influencia sobre la definición de los distintos objetivos.

Susceptibilidad de erosión		Altitud (efecto por acumulación de nieve)							
		0 – 750 msnm				Mayor a 750 msnm			
		Con fragilidad		Sin fragilidad		Con fragilidad		Sin fragilidad	
		Viento							
		Pendiente							
Baja	1	0 – 35%	1	PROD	1	PROD	2	PCL1	3
		35 – 60%	2	PROD	5	PROD	6	PCL1	7
		60 – 100%	3	PCL1	9	PCL1	10	PCL2	11
		> 100%	4	PROD	13	PCL2	14	PROD	15
Media	2	0 – 35%	1	PROD	17	PROD	18	PCL1	19
		35 – 60%	2	PCL1	21	PROD	22	PCL1	23
		60 – 100%	3	PCL2	25	PCL1	26	PCL2	27
		> 100%	4	PROD	29	PCL2	30	PROD	31
Alta	3	0 – 35%	1	PCL1	33	PROD	34	PCL2	35
		35 – 60%	2	PCL1	37	PCL1	38	PROD	39
		60 – 100%	3	PROD	41	PCL2	42	PROD	43
		> 100%	4	PROD	45	PROD	46	PROD	47

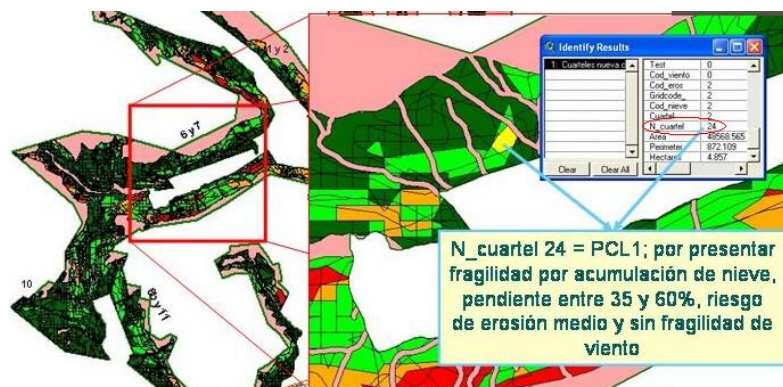


Figura 2. La codificación en formato digital permite reconocer las características que definen cada uno de los polígonos. En la figura, el polígono asume un valor de 24 (referido al Cuadro 2), donde presenta fragilidad por acumulación de nieve, pendientes entre 35% y 60% y riesgo de erosión medio.

Objetivo dos: análisis económico y programación de la cosecha

Debido a que la zona de estudio presenta una forma irregular y topografía montañosa, el análisis de distintas alternativas de caminos y la evaluación de distintas rutas para la definición del trazado más corto o económico no fue aplicado. Incluso, algunos sectores de bosque potencialmente productivo no quedaron cubiertos, porque presentaban bajos rendimientos volumétricos o no contaban con acceso factible sin considerar una mayor inversión en infraestructura.

Con el cálculo del costo unitario de cada centro de oferta se procedió a descartar centros que presentaron un costo mayor al costo de compra puesto en la planta de aserrío y elaboración. Dichos centros de oferta tenían un balance negativo en la operación de extracción y construcción de caminos y se ubicaban principalmente en los tramos terminales o cabeceras de la red vial. Estos centros de oferta además afectan los costos y la rentabilidad de los caminos anteriores, que cuentan con ese flujo de volumen para amortizar sus respectivos costos fijos. Por lo tanto, se asumió holgura sobre el costo máximo, para no producir una descalificación sucesiva. Estos centros de oferta son los que condicionan la rentabilidad y además son los últimos en ser seleccionados. En la medida que se pretenda maximizar el proyecto forestal se debería tender a marginar los sectores que presentan un balance individual negativo. Esto no siempre ocurre, porque se conjugan los requerimientos industriales con los forestales, donde los centros de oferta se mantienen igual en el análisis global, para satisfacer metas volumétricas.

En una primera evaluación, el modelo estableció como centros de oferta de menor costo algunos que consideraban la construcción de un puente de envergadura mayor al inicio del horizonte de planificación. Debido a condiciones de flujo financiero de la empresa, esta solución no era factible. Esa selección de centros de oferta se explica debido a la gran cantidad de volumen que sería evacuado por ese puente, y que amortizaría su inversión. Por tal razón, el análisis se dividió en dos ejes: uno para los cantones que no requerían la construcción del puente y otro para los que sí. Dicha construcción se postergaría mientras los volúmenes del primer sector satisficieran los requerimientos de la empresa, lo que igual significó que el puente debería estar habilitado a partir del cuarto o quinto año de proyecto.

En una segunda evaluación del problema, la solución presentó una distribución espacial heterogénea, porque tendió a seleccionar todos los centros de oferta cercanos a los caminos de acceso principales. Este resultado no se consideró operativo, ya que la concentración de la faena de cosecha disminuye otros costos, como el movimiento de campamentos, personal y maquinaria. Se agrupó el patrimonio en 25 “sectores” en función de los distintos valles y los ejes secundarios que los evacúan. Cada eje secundario fue considerado como un sector y el programa se ejecutó nuevamente para determinar su *ranking* en base al menor costo unitario total (Cuadro 3).

Cuadro 3. Selección de sectores de cosecha según costos.

Eje	Camino o sector	Ranking	Costo variable (US\$/m ³)	Costo fijo* (US\$/m ³)	Costo total (US\$/m ³)
Principal sin puente	4	1	43,0	2,6	45,5
	3	2	45,0	1,9	46,9
	8	3	38,4	8,6	46,9
	1	4	44,1	3,6	47,7
	9	5	43,0	4,9	47,9
	7	6	45,3	4,4	49,6
	5	7	45,1	7,9	52,9
	6	8	44,6	8,5	53,1
	26	9	43,4	15,4	58,8
Principal con puente	15	10	37,4	9,5	46,9
	12	11	42,2	5,1	47,2
	11	12	39,4	8,2	47,6
	14	13	45,3	2,7	48,0
	27	14	40,9	9,8	50,7
	10	15	44,7	6,5	51,2
	25	16	45,0	7,4	52,4
	13	17	46,6	7,0	53,6
	17	18	42,4	12,9	55,3
	18	19	45,2	11,4	56,5
	16	20	43,7	13,3	57,0
	19	21	47,4	13,8	61,1
	21	22	55,7	10,9	66,6
	20	23	57,0	10,0	67,0
	31	24	56,0	18,9	74,9
	23	25	61,7	20,9	82,6

* El costo fijo está transformado en costo variable equivalente, según el volumen que evacua.

Una vez determinada la secuencia de sectores a intervenir se ejecutó nuevamente el programa en el año cero, seleccionando la cantidad de centros de oferta de menor costo, por sector, necesarios para satisfacer los flujos periódicos requeridos por la empresa. Este proceso fue repetido hasta completar el horizonte de planificación. Como la asignación de años es de manera dirigida o forzada, cada vez que se cambia el año se genera un nuevo problema. Finalmente, con el problema de la asignación de los años de cosecha para las distintas ofertas resuelto, se ejecutó el programa considerando la tasa de interés, y se obtuvo el resultado final, que incluye el costo unitario y total del proyecto actualizado.

En el ejercicio, el modelo no contempla la superficie involucrada, ya que considera las existencias volumétricas. Cada centro de oferta es alimentado a la vez por uno o más cantones, por lo que el volumen no tiene una representación superficial directa. Los cantones contienen la información de rendimientos y de esquemas de cosecha, y por lo tanto el ciclo de corta que le corresponde a cada uno, con sus respectivas intensidades. Esto significa que la decisión está referida en términos volumétricos, sin importar la superficie que efectivamente corresponde cosechar. Si se quiere mantener la información por cantón, cada uno debería ser considerado como unidad independiente o centro de oferta, sin olvidar el aumento de tamaño del problema.

Los flujos anuales establecidos no permiten cumplir con la obtención de un flujo volumétrico sostenido. Esto se explica principalmente por el largo del horizonte de planificación (30 años), en relación con la rotación esperada (80 años), y porque es muy difícil lograr la regulación del patrimonio en una primera rotación. Eso no significa que el proyecto sea inviable o insustentable, pues la empresa cuenta con mayor patrimonio forestal y también porque existe un mercado de compra. Además tampoco fueron consideradas las ganancias potenciales en volumen aserrable que se pueden obtener en el largo plazo por actividades de manejo y por la incorporación del bosque secundario. Este argumento es muy importante en términos del capital de inversión y de las decisiones de abastecimiento de mediano plazo, pudiendo disminuir los volúmenes anuales esperados del patrimonio, o considerar otras fuentes de abastecimiento para períodos con disminución de flujos.

El valor presente neto (VPN) varía de positivo a negativo si se considera una tasa de interés de 9 a 10%, presentando alta sensibilidad a cualquier incremento de costos o baja de los precios de venta (VPN (9%) = US\$ 1.226). Este resultado, si bien es bajo, podría aumentar, ya que según antecedentes históricos de la empresa, se subestimaron los rendimientos esperados. Pero podría disminuir, pues los costos de operación tienden a incrementarse debido a imprevistos como condición climática y dificultades de operación.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue analizar la aplicación de herramientas prácticas para la planificación de una faena de cosecha en bosques primarios de lenga de la Undécima Región. En una primera etapa se aplicó el concepto de Evaluación Multicriterio para observar factores determinantes en las actividades a ejecutar, y realizar un análisis económico del proyecto forestal en una segunda etapa.

El uso de la Evaluación Multicriterio y herramientas SIG permitió satisfacer el primer objetivo de determinación de variables que pudieran definir distintas intensidades de manejo, y que además tuvieran una representación cartográfica.

El uso de algoritmos heurísticos fue una buena alternativa para resolver problemas de planificación que consideran la inclusión de caminos. Además, el programa computacional entregó en forma amigable una serie de tablas con los principales resultados, lo que facilitó la interpretación del usuario. La presencia de patrimonio con infraestructura inadecuada, donde se tienen costos fijos significativos, es una situación típica del bosque nativo nacional. En la medida que se cuente con mayor información, como funciones de rendimiento, se podrán realizar análisis más exhaustivos y acceder a otros programas de planificación que aborden mejor el problema en términos de rendimiento sostenido y/o sustentabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto FDI-CORFO “Modelos de gestión sostenible para incorporar bosques de lenga de Aysén a la producción nacional”, desarrollado por INFOR en conjunto con la Corporación Nacional Forestal y la empresa particular Maderas de Aysén S.A., durante 2001 – 2004. Se agradece la participación de los que colaboraron en el proceso del juicio de expertos. Agradecemos la colaboración de Jorge Gayoso y Gonzalo Paredes, de la Universidad Austral de Chile, en el análisis de redes y la facilitación del programa computacional. A Cristian Palma y Verónica Emhart, por los valiosos comentarios a este documento.

REFERENCIAS

Belton, V. & Stewart, T. J. 2001. Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers. Boston, First Edition. 396 pp.

Bettinger, P.; Graetz, D.; Boston, K.; Sessions, J. & Chung, W. 2002. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica* 36(2): 561-584.

Boston, K. & Bettinger, P. 1999. An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest-scheduling problems. *Forest Science* 45: 292-301.

CONAF-ONF. 1997. Plan de ordenación Reserva Nacional Malleco. 195 pp.

Chung, W. & Sessions, J. 2000. NETWORK 2000, a program for optimizing large fixed variable cost transportation problems. Disponible en: <http://www.cof.orst.edu/cof/fe/students/research/chung2/index.htm> (última consulta: septiembre 2006).

Chung, W. & Sessions, J. 2003. NETWORK 2000, a program for optimizing large fixed and variable cost transportation problems. In: *Systems Analysis in Forest Resources: Proceedings of the 8th Symposium, Snowmass Village, Colo., 27 – 30 September 2000*. Vol. 7 of the Managing Forest Ecosystems series. G. T. Arthaud and T. M. Barrett (technical compilers). Kluwer Academia Publishers: Dordrecht. Pp. 109-120.

Crowe, K. A. & Nelson, J. D. 2005. An evaluation of the simulated annealing algorithm for solving the area-restricted harvest scheduling model against optimal benchmarks. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2500-2509.

Diario Oficial de la República de Chile. 1999. Ley 19.606. Establece incentivos para el desarrollo económico de las regiones de Aysén y de Magallanes, y de la provincia de Palena. Ministerio del Interior. Publicada con fecha 14 de abril de 1999.

Dueck, G. 1993. New optimization heuristics: the Great Deluge and Record-to-Record Travel. *Journal of Computational Physics* 104: 86-92.

Epstein, R.; Weintraub, A.; Sessions, J.; Sessions, B.; Sapunar, P.; Nieto, E.; Bustamante, F. & Musante, H. 2001. PLANEX: a system to identify landing locations and access. In *Proceeding of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*, Seattle, Wash., 10 – 12 December 2001. College of Forestry, University of Washington, Seattle, Wash. Pp. 190-193.

Gayoso, J.; Iroumé, A.; Paredes, G. & Valencia, R. 1991. Análisis de abastecimiento de una planta de celulosa en la provincia de Valdivia. Informe de Convenio N° 186. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 168 pp. y anexos.

Gayoso, J. & Iroumé, A. 1993. Catastro de caminos prioritarios para el abastecimiento de una planta de celulosa en la provincia de Valdivia. Informe de Convenio N° 210. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 119 pp. y anexos.

Gayoso, J.; Neculman, M. & Muñoz, R. 1995. Proyecto de cosecha forestal. Predio La Esperanza. Inversiones Forestales S.A. Informe de Convenio s/n. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 50 pp. y anexos.

Gayoso, J. 1997. Bases para la gestión sustentable del predio San Pablo de Tregua de la Universidad Austral de Chile. Tes. FLACAM VII Curso de Formación Ambiental, Cátedra de la UNESCO para el Desarrollo Sustentable. 99 pp. y anexos.

Gayoso, J. & Muñoz, R. 2000. Un algoritmo heurístico para resolver la asignación de usos alternativos en áreas rurales. *Bosque* 21(1): 3-12.

Kangas, A.; Kangas, J. & Laukkanen, S. 2006. Fuzzy Multicriteria Approval Method and its Application to Two Forest Planning Problems. *Forest Science* 52(3): 232-242.

Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. & Vecchi, M. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220(4598): 671-680.

Lockwood, C. & Moore, T. 1993. Harvest scheduling with adjacency constraints: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 468-478.

Loewe, V.; Toral I., M.; Pineda B., G.; López L., C. & Urquieta N., E. 1997. Monografía de lenga, *Nothofagus pumilio*. Potencialidad de especies y sitios para una diversificación silvícola nacional. INFOR-CONAF. 103 pp.

Maness, T. & Farrell, R. 2004. A multi-objective scenario evaluation model for sustainable forest management using criteria and indicators. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2004-2017.

Martínez Pastur, G.; Lencinas, M.; Cellini, J.; Díaz, B.; Peri, P. & Vukasovic, R. 2002. Herramientas disponibles para la construcción de un modelo de producción para la lenga (*Nothofagus pumilio*) bajo manejo en un gradiente de calidades de sitio. *Bosque* 23(2): 69-80.

Mendoza, G. A. & Martins, H. 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management* 230: 1-22

Nelson, J. 2001. Assessment of harvest blocks generated from operational polygons and forest-cover polygons in tactical and strategic planning. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 682-693.

Nelson, J. 2003. FPS-Atlas Database Manual Version 6. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 84 pp.

Pukkala, T. & Kurttila, M. 2005. Examining the performance of six heuristic optimization techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica* 39(1): 67-80.

Reeves, C. R. (ed.). 1993. Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. Advanced Topics in Computer Science. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. 320 pp.

Schmidt, H. & Urzúa, A. 1982. Transformación y manejo de los bosques de lenga en Magallanes. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Ciencias Agrícolas 11. Santiago, Chile. 62 pp.

Schmidt, H.; Caldentey, J. & Gaertig, T. P. 1992. Análisis silvicultural de los ensayos. XII Región. Informe Lenga 1992. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Corporación Nacional Forestal XII Región. 37 pp.

Schmoldt, D. L.; Kangas, J. & Mendoza, G. A. 2001. Basic Principles of Decision Making in Natural Resources and the Environment. Chapter One. Pp. 1-13. In: Schmoldt, D. L., Kangas, J., Mendoza, G. A. & Pesonen, M. (eds.) 2001. Managing Forest Ecosystems. The analytical Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Kluwer Academic Publishers. 305 pp.

Sessions, J. 1987. A heuristic algorithm for the solution of the variable and fixed cost transportation problem. In: Proceedings, the 1985 Symposium on System Analysis in Forest Resources. University of Georgia, Athens, GA. Pp. 324-336

Zimmermann, H.-J. 2000. An application-oriented view of modeling uncertainty. *European Journal of Operational Research* 122: 190-198.