

ARTICULOS

Un algoritmo heurístico para resolver la asignación de usos alternativos en áreas rurales

A heuristic algorithm for solving the alternative rural land use allocation

JORGE GAYOSO, ROBERTO MUÑOZ

Universidad Austral de Chile, Instituto de Manejo Forestal, Casilla 567, Valdivia, Chile.

SUMMARY

To solve territorial arrangement and alternative land use allocation, a heuristic algorithm was used. The study area included 2216 hectares located in the Andes range, Panguipulli, 10th Region, Chile. To solve the problem, a links and nodes network was established. The nodes represented multiple products from different productive units, time periods and destinations. The links represented fixed and variable transportation and operational costs and investments and unit revenues from each alternative use. The analysis considered the following alternative uses, wood products from native forests, non-use value of native forests as carbon stock and conservation or existence value. Cattle, crop farming and *Pseudotsuga menziesii* plantations are considered for areas without vegetation or covered with bushes. The solution chooses the most efficient use, the path and the destination for multiple time periods maximizing the net present value. Native forest areas allocate productive forest use when the wood net benefits exceed the net present value as carbon stock. The current areas without forests are recommended as cattle and *Pseudotsuga menziesii* plantations over wheat cultures depending on terrain condition. This work proves that the methodological tool proposed, selects uses to maximize the total net present profits, reaching an efficient solution that could be extended to solve similar or more complex problems which include different uses and wider territorial areas.

Key words: spatial analysis, land use allocation, transportation planning.

RESUMEN

El presente trabajo emplea un algoritmo heurístico para resolver un problema de ordenamiento territorial y asignación de usos alternativos en un área de 2216 hectáreas de la precordillera andina de la comuna de Panguipulli, Décima Región de Chile. El problema se resuelve a través de una red de arcos y nodos. Los nodos representan la oferta de los diversos productos en las distintas unidades productivas y períodos y de los variados mercados de destino de los diferentes productos, los arcos representan los costos fijos y variables tanto operacionales como de transporte e inversiones y los ingresos unitarios por cada uso alternativo. El análisis considera como usos alternativos: la producción forestal de bosque nativo y el no uso con venta de stock de carbono y conservación por valor de existencia. Para las áreas desprovistas de vegetación o cubiertas de matorrales se plantean los usos ganadero, cultivos agrícolas y plantación con pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*). La solución escoge el uso, la ruta y el destino más eficiente para múltiples períodos, maximizando el valor neto presente. Las áreas con bosque nativo eligen el uso productivo forestal cuando el beneficio descontado de la producción de madera sobrepasa el valor neto presente como stock de carbono. Las áreas actualmente sin bosque muestran, según la condición del terreno, que los usos más recomendados son la ganadería y la plantación con la especie pino oregón por sobre los cultivos de trigo. Este trabajo demuestra que la herramienta permite seleccionar los usos de tal manera de maximizar los beneficios netos presentes totales, llegando a una solución eficiente y que puede ser extendida para resolver problemas semejantes o más complejos que comprendan diferentes usos y espacios territoriales más amplios.

Palabras clave: análisis económico espacial, asignación de uso de la tierra, planificación del transporte.

INTRODUCCION

El territorio, delimitado mediante algún atributo específico de orden político, administrativo, económico, productivo, técnico, hidrográfico o de recursos, constituye un sistema de referencia para el desarrollo de proyectos (Gaviño 1995). La Teoría Económica Regional, desde el siglo XIX, ha venido abordando el estudio del análisis económico espacial con el objeto de planificar y estructurar el territorio, localizar las actividades económicas en el espacio, decidir la asignación eficiente de cultivos y usos y delimitar áreas de mercado. Distintas teorías se han aplicado para la búsqueda de soluciones, como la minimización de los costos de transporte, el equilibrio económico en el territorio, la renta diferencial del suelo y el análisis multivariante (Herrero y Fernández 1990). Sin embargo, estos métodos presentan algunas restricciones para resolver integralmente problemas complejos como el ordenamiento de espacios discontinuos, productividad heterogénea y costos de transporte no lineales.

El método más común, en el área forestal, para determinar la oportunidad y magnitud de las inversiones de capital que minimicen los costos combinados de transporte y facilidades para mover bienes desde sus orígenes hacia sus destinos, era en los años setenta la programación entera mixta (Sessions 1987). Sin embargo, a medida que aumenta el número de puntos de origen y destino el problema se torna complejo, demoroso de resolver y requiere computadoras de gran capacidad. A fines de los años ochenta, el rápido avance de las computadoras y el desarrollo de algoritmos heurísticos proveen una alternativa atractiva a los métodos tradicionales.

Algoritmos de ruta crítica se han aplicado en la resolución del problema de transporte (Sessions y Paredes 1987, Serali y Liu 1990, Liu y Sessions 1992). Aplicaciones señaladas por Sessions (1992) y la bibliografía revisada dicen relación con la modelación del transporte y la búsqueda de la ruta óptima, considerando: sistemas alternativos de cosecha forestal, destinos alternativos, múltiples productos, localizaciones alternativas de caminos, estándares alternativos de caminos, períodos múltiples de tiempo, costo mínimo o máximo valor. Además, la disponibilidad de modelos digitales del terreno y sistemas de información geográfica (SIG) ofrece una oportunidad para analizar espacialmente las unidades y generar la informa-

ción para las redes de forma automática (Liu y Sessions 1992).

El análisis de redes ha sido aplicado anteriormente para resolver el problema de gestión forestal y planificación de la cosecha forestal con restricciones ambientales (Gayoso *et al.* 1995, Gayoso 1997), en la localización industrial de una planta de celulosa con abastecimiento de 2.75 millones de metros cúbicos anuales (Gayoso *et al.* 1991) y en la determinación de flujos de transporte forestal (Gayoso e Iroumé 1993).

Este trabajo pretende ampliar la aplicación del método en la solución de un problema de asignación de usos del territorio. Este problema implica resolver tanto la planificación de carácter estratégico como táctica, determinando el uso económicamente más conveniente para cada subunidad predial analizada, sujeto a restricciones ambientales y de manejo, de tal manera de obtener el máximo valor neto presente. En particular, se trata de resolver o asignar el uso, el lugar de destino de los productos, el período de intervención en el caso del uso productivo forestal, cuáles y cuándo construir caminos, la ruta hacia el destino desde cada origen, el volumen de productos que pasará por cada tramo de camino, los costos variables y fijos atribuibles a cada unidad, y el ingreso total del proyecto de períodos múltiples.

MATERIAL

El método se aplica sobre el predio San Pablo de Tregua, de propiedad de la Universidad Austral de Chile, ubicado en la comuna de Panguipulli, Décima Región. El predio, de 2216 hectáreas, se encuentra actualmente sin intervención a la espera de definir sus usos. El 78% del predio está cubierto por bosques del tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa (*Nothofagus dombeyi* - *Nothofagus alpina* - *Laureliopsis philippiana*). La asociación Ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendron uviferum*) ocupa sólo 29.3 hectáreas (1.3%) y corresponden a la unidad que se encuentra en el límite norte de su distribución. Las áreas restantes corresponden a bosque degradado, matorrales y praderas. Los productos maderables del bosque quedan restringidos a maderas tipo torno y aserrable, dado que no existe mercado para los productos madera pulpable y leña, bajo las actuales condiciones de precio y distancia del predio hasta los centros de demanda. De acuer-

do con el último inventario sistemático realizado en 1994, se obtiene una oferta total de alrededor de 244000 metros cúbicos de madera. Esto es, cada hectárea de bosque puede suministrar de 200 a 300 m³, de los cuales un 25% corresponde a maderas tipo torno y el resto aserrable. La especie dominante y casi exclusiva en el rango de los diámetros mayores de 100 centímetros es Coihue.

Este estudio toma como base los antecedentes del ambiente físico y biológico y los inventarios de los recursos forestales elaborados con motivo del estudio "Bases para la gestión sustentable del predio San Pablo de Tregua de la Universidad Austral de Chile" (Gayoso 1997). La redefinición de las áreas homogéneas y los restantes datos, especialmente aquellos de costos, se han preparado especialmente para este trabajo.

Sin discutir ni tomar partido de la conveniencia ética de una u otra alternativa de uso y manejo, este estudio analiza las siguientes opciones desde la perspectiva económica:

- Áreas cubiertas de bosque nativo: (a) producción de madera con y sin restricciones de protección y conservación de suelos; (b) intercambio gaseoso, fijación y stock de carbono; (c) resguardo de la biodiversidad, fuente de protección de la vida silvestre, recreación escénica y paisajística, regulación del ciclo hidrológico y conservación del recurso agua. El uso social, incorporando la acogida de público con fines de docencia, investigación y recreación no se analiza.
- Áreas desprovistas de vegetación: (a) producción ganadera, (b) producción de trigo y (c) producción forestal basada en plantaciones de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*).

La legislación vigente permite, para el tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa, la aplicación de tres métodos de corta: "árbol semillero", sin restricción hasta 30% de pendiente y hasta 45% de pendiente en superficies menores de 20 hectáreas; "de protección" hasta el 60% de pendiente; y "selectiva" hasta sobre 60% de pendiente. Correspondiente con las opciones anteriores, este estudio propone la intervención de las unidades de uso productivo forestal mediante cortas con retención variable y ordenación en monte alto regular con clases de edad en equilibrio.

Desde una perspectiva ambiental, la información descriptiva actual y la opinión de los especia-

listas en flora, fauna, suelos, hidrología y ecología de comunidades, hace presumir que un proyecto de uso múltiple en el predio San Pablo, ajustado a adecuados criterios de sustentabilidad -por ejemplo, que no considere la sustitución del bosque nativo, ni la fragmentación del bosque, ni la cosecha a tala rasa de grandes superficies-, no debiera generar cambios importantes en las variables ambientales. Esto se basa principalmente en la aceptación de que los ecosistemas del predio San Pablo no son exactamente únicos, que ocurre una alta diversidad de especies asociada al estado de madurez del bosque, lo que le otorga cierto nivel de estabilidad. Los suelos, si bien inestables en condiciones de temporada húmeda, son manejables adecuando la técnica y época de eventuales intervenciones (Gayoso 1997).

El no uso del bosque o venta de stock y captura de carbono proviene de un mercado naciente. Países latinoamericanos han comenzado a negociar e invertir en el mercado del carbono, como Costa Rica, Guatemala, México, Bolivia y Argentina. En Costa Rica se paga un subsidio de 10 a 40 US\$/ha cada año, con el fin de preservar y expandir bosques naturales (Mitchell 1998). Nordhaus (1992) ha estimado el valor de captura de carbono en poco más de US\$5/tC¹, basado en las pérdidas económicas asociadas con una tonelada marginal de carbono, si el stock de carbono en la atmósfera se duplica. Proyectos financiados en Ecuador estiman un valor de US\$ 5/tC que no se libera (IICA 1994).

El valor de existencia de un bosque sería determinable con algún método de valoración directa como la valoración contingente. Para este ejercicio, sólo con la finalidad de demostrar su posible inclusión en el análisis, en el caso de los rodales de Ciprés de las Guaitecas, se otorgó un valor igual al doble del valor como stock de carbono y pensando que en realidad corresponde a una unidad especial, con un recurso escaso y único en el área que se analiza. Por lo tanto, el valor debía considerar el valor de uso directo (recreación), los valores de uso indirecto (captura de carbono, protección de suelos, regulación hídrica), los valores por no uso (valor de opción o legado, valor intrínseco o de existencia, altruismo).

¹ tC, tonelada de carbono.

METODOLOGIA

La determinación de áreas homogéneas. Todos los proyectos que están asociados a territorio necesitan definir unidades de análisis que tengan cierta homogeneidad: física (respecto de su geomorfología, topografía, suelos, exposición, altitud, pluvio-metría, características del paisaje), económica (recursos, uso actual y potencial, funcionalidad), y social (densidad poblacional, ruralidad, área de influencia, pertenencia administrativa).

Siguiendo la metodología del Office National des Forêts de Francia (Prieto y López 1993), se definieron zonas homogéneas en relación con los atributos del medio natural, sus riquezas, potencialidades y restricciones. Además, se incorporó a la diferenciación un conjunto de variables abióticas (pendiente, exposición, altitud, suelo, precipitaciones, la presencia de cauces) y bióticas (composición florística, estado de conservación de las especies, estructura de la vegetación y presencia de árboles notables), las que fueron analizadas con ayuda de un sistema de información geográfico.

La zonificación entregó 67 unidades de áreas homogéneas que comprenden 35 clases diferenciables. Además dos clases con restricciones especiales: una, las franjas de protección de los cursos de agua, con una superficie de 207.9 hectáreas y otra, las áreas de montaña y presencia de rocas que alcanza 79.7 hectáreas. Estas dos últimas no se incorporaron en el análisis.

El análisis heurístico de redes. Conceptualmente el análisis parece convencional en cuanto al trabajo con redes y determinación de los beneficios marginales de cada unidad, salvo que simultáneamente considera la heterogeneidad del predio y múltiples períodos, mercados y productos.

El problema se dibuja como una red de arcos y nodos y se resuelve por análisis heurístico de redes por medio del software Network II (Sessions y Sessions 1989). Los nodos representan una oferta de las distintas unidades productivas bajo análisis, intersecciones de la red de arcos de los caminos proyectados y existentes y los distintos mercados de destino de los diferentes productos. A los arcos se les asignan los costos fijos y variables tanto operacionales como de transporte e inversiones y los ingresos por cada uso alternativo.

La solución incluye la asignación del uso, la ruta óptima desde cada nodo de origen hasta los diferentes puntos de demanda de los productos, la

determinación de 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 arco anualmente, el año de habilitación de los caminos y los beneficios totales actualizados (VAN) del proyecto.

Descripción del algoritmo. Network calcula el mínimo costo o máximo valor de la red usando un algoritmo de ruta crítica (la ruta más corta) para resolver el problema de los costos variables. La primera iteración minimiza los costos variables e ignora los costos fijos. Los costos fijos se introducen al problema de los costos variables redefiniendo los costos variables al final de cada iteración. Esta redefinición convierte los costos fijos en costos variables equivalentes (Sessions 1987).

El proceso hacia la solución comienza con la clasificación de ofertas por período y luego se resuelve el problema de la ruta más corta y asignación de los costos fijos para cada arco asociado con la mejor solución para los costos variables. La suma de los volúmenes de productos que van sobre cada arco se acumulan y así al final de la primera iteración se tienen los volúmenes por cada arco. Luego se recalculan los costos variables para cada arco, sumando a los costos variables del arco el costo fijo del mismo dividido por el volumen del arco. El volumen sobre todos los arcos se vuelve a cero y se inicia la segunda iteración. El procedimiento continúa hasta que se obtiene la misma solución para dos iteraciones.

Una de las limitaciones de Network II es que no permite colocar restricciones a los arcos, por lo cual para algunos problemas hay que recurrir a ciertos trucos o corridas múltiples, ya sea agregando arcos ficticios y supranodos o modificando directamente los archivos. También fue el caso de las transformaciones volumétricas de las unidades con bosque nativo que según el uso debían calcularse con diferentes referentes.

Metodología para la evaluación económica. Para maximizar los beneficios y ordenar el turno de la opción de cosecha de las unidades, dada la imposibilidad de incorporar directamente restricciones silviculturales y ambientales, la primera vez se resolvió el problema sólo con las ofertas de las unidades con bosque nativo, considerando toda la oferta al año cero para sus tres opciones de uso. Las unidades asignadas al uso maderero se orde-

naron según ingreso decreciente, con lo cual se asigna el período de cosecha, de tal forma de cumplir la restricción del plan de ordenamiento forestal o máxima tasa de corta en el período y la condición de máxima rentabilidad.

En el caso de las unidades sin bosque, las opciones de producción que entregan productos anuales como es el caso de carne y el trigo, se llevaron a un valor de producción quinquenal hasta igualar la edad de rotación de la producción más larga, de tal manera de hacer comparables los proyectos. Con esta nueva información se complementa el archivo de ofertas y se resuelve nuevamente incluyendo ahora todos los usos. Aquí opera la comparación de rentabilidad de los usos con múltiples períodos y su resultado asigna el uso y los centros de destino de los productos.

Con la finalidad de simplificar la presentación de la solución, se consideró un producto único por cada uso. No obstante, la solución de productos múltiples es simple y requiere sólo agregar las ofertas y destinos correspondientes.

La evaluación económica tiene en consideración las inversiones necesarias en caminos, los costos operacionales de los procesos productivos, los costos de transporte, los costos por establecimiento y manejo de los distintos usos, los costos de administración y los ingresos por la venta de los productos, todo a precios de mercado. La evaluación económica no consideró los eventuales flujos por investigación, docencia y ecoturismo que serían sumables a la condición de no uso productivo (áreas de conservación), dado que por ahora se consideraron inciertos y se estimaron poco relevantes en magnitud en comparación con los ingresos por madera y carbono.

El proyecto plantea un flujo constante de productos (máximo teórico), basado en el concepto de rendimientos no decrecientes para un período de 40 años analizados en quinquenios y tasa de descuento del 10 por ciento. En esta oportunidad, dado el objetivo metodológico del trabajo, el beneficio neto actualizado de la solución no se sensibilizó para los factores que se consideran relevantes en este tipo de proyectos: variaciones del volumen a cosechar, tasa de descuento, costos operacionales, precios de los productos y la inversión en caminos.

Para efectos del análisis del ingreso por stock carbono, se tomó en cuenta que un metro cúbico de biomasa forestal contiene 0.225 tC y su valor

es US\$ 7.5 tC. Como el análisis de la red trabaja con el volumen de madera que se transporta y éste es diferente al volumen de madera en pie para el cálculo de la biomasa disponible para la negociación por carbono, se ajustó el precio del carbono para compensar la diferencia volumétrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la red. La red de arcos y nodos de la figura 1 corresponde a la representación gráfica, no a escala, de las distintas unidades de oferta y demanda de la red interna, además de los segmentos de caminos y arcos virtuales. En la figura 2, separada de la figura 1 sólo por facilidad de expresión, se incluye la parte de la red externa del predio y que corresponde a la oferta de caminos en la provincia de Valdivia. Para la operación del software Network II, esta red se ordena en un archivo único de "arcos", que contiene el nodo de inicio, el nodo de término, el costo variable y el costo fijo. De igual forma, se construye el archivo de "ofertas", que incluye el número del nodo donde se conecta la oferta de una unidad a la red, el nodo de destino o centro de demanda del producto, la cantidad de unidades de productos que se ofertan en la unidad y el año en que ocurre. En la construcción del problema se asumió que el transporte de retorno se haría por los mismos caminos, siguiendo igual ruta que la de salida. Este problema consideró 451 arcos, 205 nodos y 105 ofertas.

Para hacer que el software asigne el uso, teniendo múltiples destinos posibles, se agregan a la red nodos virtuales de destino. Así, por ejemplo, una oferta determinada de un producto se ingresa a la red (nodo de entrada) y se envía hacia un nodo de destino (nodo de salida). Todos los potenciales destinos que pueden recibir el mismo producto se conectan con arcos virtuales (líneas segmentadas) a un nodo virtual, que actúa como destino final y asignador del uso. De esta manera, todos los productos llegan al nodo virtual. Para identificar el uso y centro de demanda basta con revisar los nodos anteriores al término de la ruta. Por ejemplo, revise la oferta o unidad 96R (figuras 1 y 2) que corresponde a un rodal con bosque nativo y siga su ruta para conocer el uso asignado y la localidad o centro de demanda: 96R-28-27-20-25-24-16-15-14-13-12-11-10-9-8-7-6-5-4-3-2-1-4e-3e-2e-2p2-2p1-1e-1p2-1p1-Pullinque-Panguipulli-Malalhue-Usos Bosque.

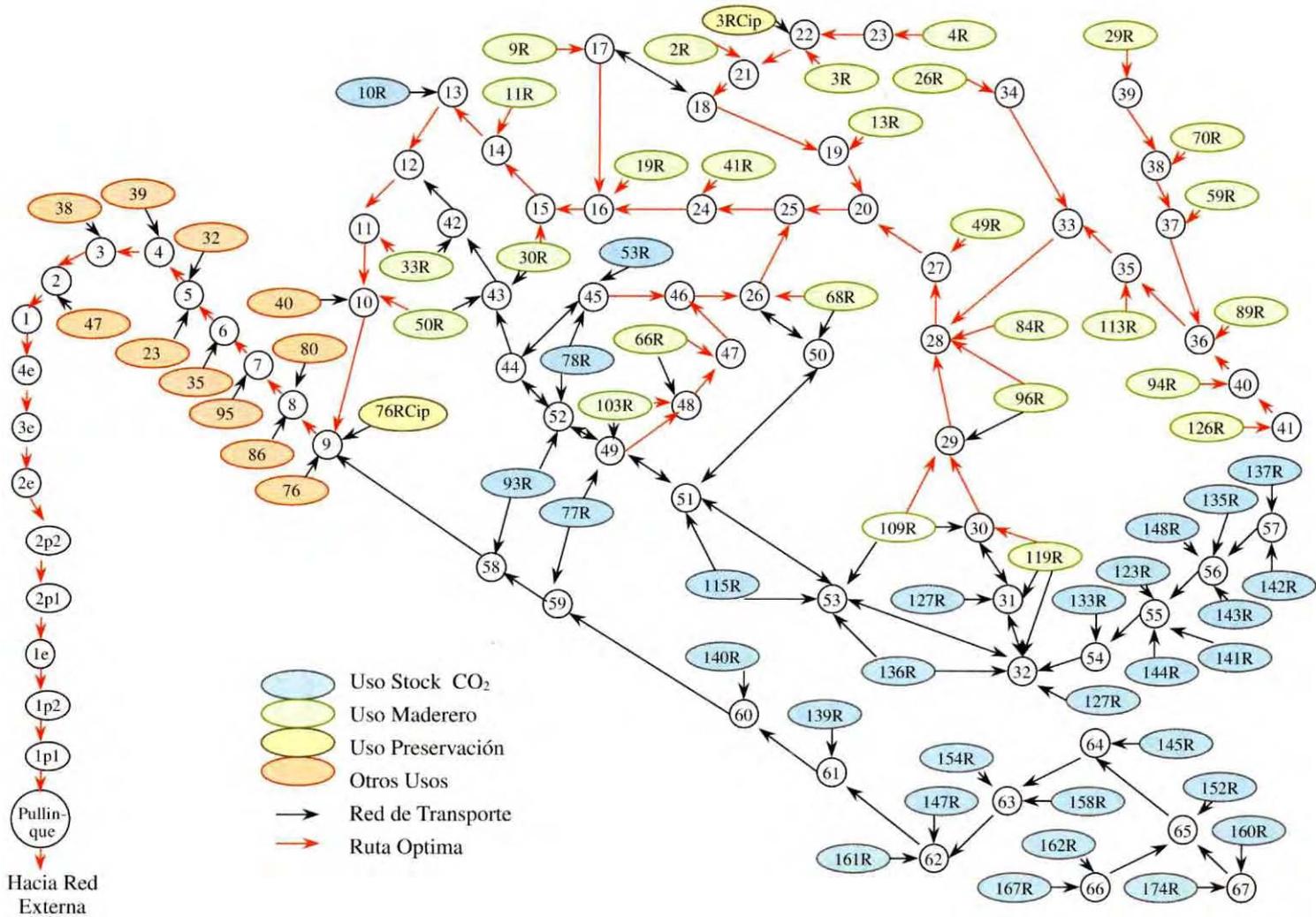


Figura 1. Red interna con nodos de oferta y arcos de caminos.
 Internal network with sale nodes and road links.

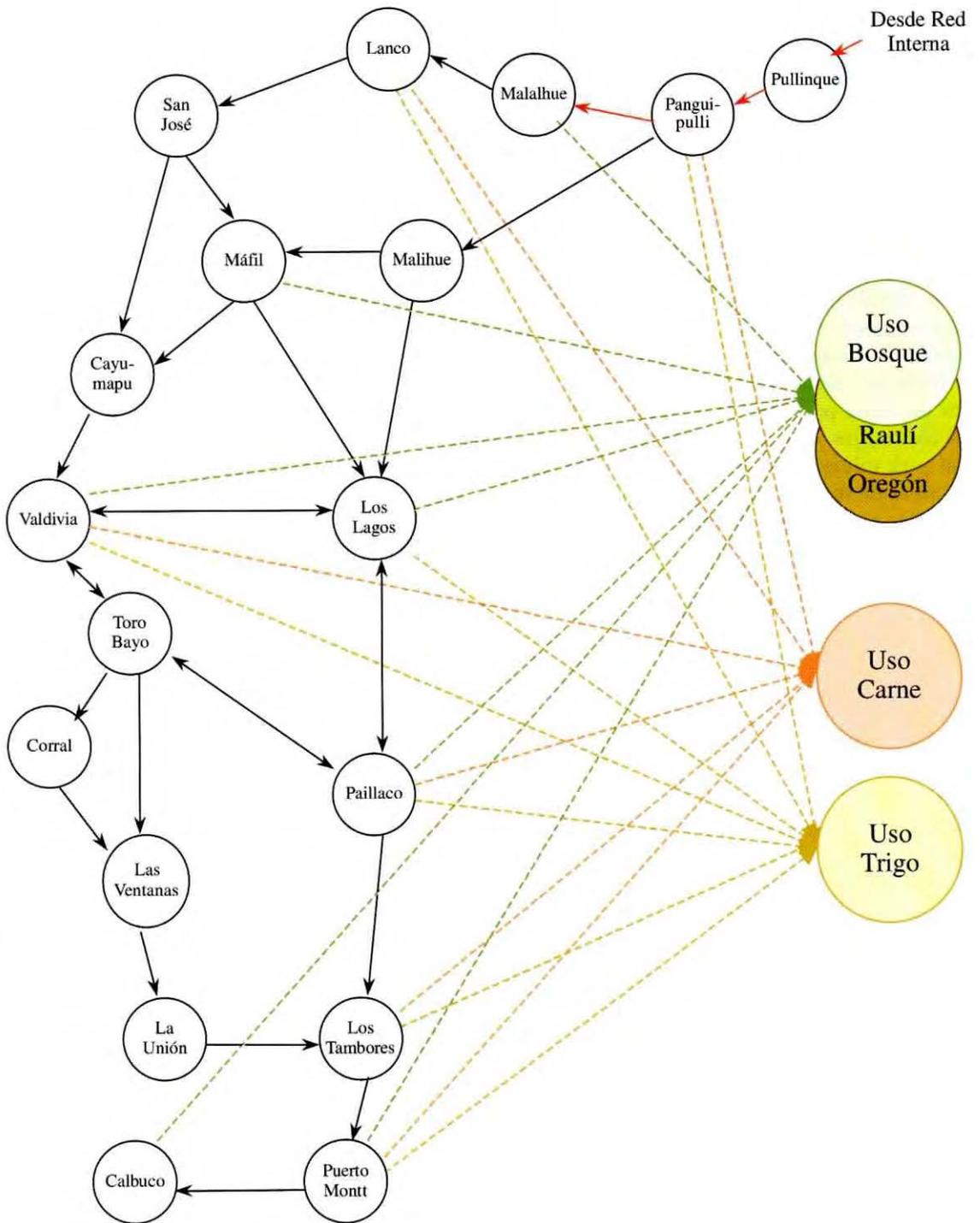


Figura 2 Red externa de nodos de demanda y red pública de caminos
Demand nodes external network and public roads network

Este mismo nodo de ejemplo sirve para demostrar cómo se resuelve la localización, construcción y el estándar de caminos propuestos. La conexión de la oferta a la red es el nodo 96R, la ruta indica que elige 96R-28 en lugar de la otra opción 96R-29, y como el flujo será el primer período, deberá habilitarse el año cero sólo el tramo de camino a transitar. Para facilidad de lectura, se han marcado con líneas rojas todas las rutas óptimas desde las distintas ofertas hacia sus destinos. Es decir, en el caso de la red interna, donde los caminos hoy sólo están planificados, la ruta roja corresponde a los caminos a ser construidos; donde existen deberán habilitarse o mantenerse.

Network, además de la ruta, ordena las unidades de oferta por ingresos decrecientes. Detalla los costos fijos y variables atribuibles a cada unidad y el volumen que pasa por cada arco. Esta información se entrega para cada período de análisis, que en este caso por razones de simplifica-

ción se hizo por quinquenios en lugar de hacerlo año a año. Al final entrega los beneficios totales y unitarios.

Para efectos del análisis, se descartaron las áreas que la regulación obliga a conservar, como es el caso de las franjas adyacentes a los cursos de agua permanente. En la figura 1, el color de la oferta representa el uso asignado por el análisis: verde (uso productivo maderero del bosque nativo), azul (uso stock de carbono), amarillo (uso preservación por valor de existencia), café (otros usos: ganadero, trigo y plantación con pino oregón).

Asignación de usos. La solución muestra la asignación de 27 unidades al uso productivo maderero (32.15% de la superficie predial), 29 unidades al uso como stock de carbono (37.16%), 2 unidades de conservación que corresponden al Ciprés de las Guaitecas, 4 unidades de plantación de pino oregón y 7 al uso ganadero (figura 1, cuadro 1).

CUADRO 1

Uso asignado por unidad territorial.
Use allocated by territorial unit.

Usos	Unidades territoriales	Superficie (hectáreas)
Productivo maderero	2R,3R,4R,9R, 11R, 13R, 19R,26R, 29R,30R,33R,41R,49R,50R,59R, 66R,68R,70R,84R,89R,94R,96R, 103R,109R, 113R,119R, 126R	712.5
Stock de carbono	10R,53R,77R,78R,93R,115R,123R, 127R,133R,135R,136R,137R,139R, 140R,141R,142R,143R,144R,145R, 147R,148R,152R,154R,158R,160R, 161R,162R,167R,174R	823.5
Existencia	3Rcip, 76Rcip	14.0
Pino Oregón	32, 35, 39, 47	177.4
Ganadería	23, 38, 40, 76, 80, 86, 95	106.6
Protección de cauces	No consideradas en el análisis	207.9
Areas rocosas y no productivas	No consideradas en el análisis	174.1

R = rodales de Coihue-Raulf-Tepa; Rcip = rodales de ciprés.

CUADRO 2

Beneficios netos por quinquenio, capitalizados al año 35 (US\$).

Net profits every five years, compounding up to the 35th year (US\$).

Unidad	Uso	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	Total
32	Ganadería	-23243	24324	15103	9378	5823	3616	2245	37246
32	P. Oregón	0	0	0	0	0	0	0	51641
35	Ganadería	-17223	17390	10798	6704	4163	2585	1605	26022
35	P. Oregón	0	0	0	0	0	0	0	36000
39	Ganadería	-5479	5537	3438	2135	1325	823	511	8289
39	P. Oregón	0	0	0	0	0	0	0	11618
47	Ganadería	-5252	5277	3276	2034	1263	784	487	7869
47	P. Oregón	0	0	0	0	0	0	0	11279

Las unidades 32, 35, 39 y 47 presentaron rentabilidad positiva en los rubros plantación de pino oregón y ganadería, seleccionándose el uso forestal por presentar una renta mayor. Para efectos de comparación de la renta, los ingresos quinquenales de la ganadería se capitalizan al año 35, a una tasa del 10%, edad a la que se cosecha la plantación de pino oregón (cuadro 2).

En general, la asignación del uso productivo maderero corresponde con aquellas unidades que presentan mayor volumen de maderas aserrables y para torno por unidad de superficie, se encuentran en topografías más moderadas, lo cual conduce a costos de cosecha menores y presentan menor requerimiento de construcción de caminos. Por ello, se aprecia en la figura 2 que las unidades más alejadas no son elegidas para este uso. Igualmente unidades como la 78R, 53R y 10R no se eligen por el bajo volumen unitario que es inferior a 150 m³/ha. El tipo de corta es correspondiente con las condiciones topográficas de la unidad, así la corta selectiva es la única aceptada para pendientes del terreno superiores al 45%, ya que permite cortar sólo el 30% del volumen. Esto hace que, en general, el volumen a extraer por hectárea sea bajo, aun cuando el volumen total sea de interés, quedando en mejor opción la venta como stock de carbono. Además, para el caso del carbono se ahorra la inversión en caminos. Es el caso de unidades como la 93R y 115R. Por el contrario, unidades con mucho volumen, aun cuando alejadas, llegan al uso productivo maderero, como el caso de la unidad 119R.

El análisis global entrega un VAN no despreciable de US\$ 370169. De este valor, sin embargo, la mayoría corresponde al uso maderero con US\$ 348429 (94%). El resto se distribuye como sigue: US\$ 4492 al uso ganadero, US\$ 11493 por la venta de carbono y US\$ 5687 por la plantación de pino oregón. A pesar del valor conservador utilizado para el carbono, US\$ 7.5/tC (semejante con US\$ 0.78/tC/año), y su poca incidencia en el valor total del resultado, es significativo el número de unidades territoriales que se asignan a este uso.

Para verificar que se trata de la mejor solución, se volvió a resolver el problema modificando la asignación de uso de algunas unidades al azar. Comparando el VAN, se demuestra que la solución es eficiente (cuadro 3).

CUADRO 3

Validación de la solución de Network
Validation of Network outputs

Tipo de solución	VAN en US\$	Variación en US\$
Network	370169	0
Forzando la unidad 84 de uso madera a carbono	323494	-46674 (12.6%)
Forzando la unidad 38 de uso ganadero a pino oregón	368592	-1577 (0.4%)

Finalmente, también se evaluó el tiempo requerido por el software Network II para alcanzar la solución. En promedio en una máquina con procesador Pentium Intel de 133 Mhz y 16 MB en RAM, esta se obtiene en 12 segundos. Cien iteraciones toman alrededor de 1 minuto.

CONCLUSIONES

Los resultados de la solución al problema planteado demuestran que la aplicación del algoritmo heurístico de redes resuelve adecuadamente la asignación de los usos y define los destinos de los diferentes productos, las rutas óptimas desde cada oferta, los caminos a construir, los volúmenes de transporte por arco, considerando los atributos de cada unidad y múltiples períodos, maximizando el valor neto presente.

Por consiguiente, el método es aplicable a otras áreas más extensas de territorio y otros usos, mientras sean determinables sus costos operacionales y el valor de los productos en el mercado. Las limitaciones del método comprenden la imposibilidad de introducir restricciones a los arcos.

A futuro, sería interesante poder introducir restricciones de adyacencia a las unidades espaciales y otras de tipo cualitativo. Una forma de hacerlo sería mediante un análisis multicriterio externo, para luego introducir ponderaciones en las unidades. Hoy están en desarrollo otras herramientas de simulación basadas en modernas técnicas heurísticas para problemas combinatoriales. Estas permiten "templar" la solución considerando condiciones especiales de perturbación, además de considerar las variaciones de las unidades en cuanto a recurso, topografía, condiciones de suelo, limitaciones ambientales, usando para ello la información proveniente de bases de datos espaciales y georreferenciadas. Esto será especialmente útil en problemas de planificación estratégica donde el futuro está lleno de incertidumbre.

BIBLIOGRAFIA

- GAVIÑO, M. 1995. La Ingeniería del Territorio y el Manejo de Cuencas. En: PESCI, R. 1995. *Proyección Ambiental. Documentos Ambiente*. Año 1, N° 2: 60-69, La Plata, Argentina.
- 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 p. y anexos.
- GAYOSO, J., A. IROUME, G. PAREDES, R. VALENCIA. 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 p. y anexos.
- GAYOSO, J., A. IROUME. 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 p. y anexos.
- GAYOSO, J., M. NECULMAN, R. MUÑOZ. 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 p. y anexos.
- HERRERO, L., J. FERNANDEZ. 1990. *El sector industrial en Castilla y León: teoría estructura y comportamiento*. Consejería de Economía y Hacienda, Junta de Castilla y León. Ponferrada (León), 443 p.
- LIU, K, J. SESSIONS. 1992. Preliminary Planning of Road Systems Using Digital Terrain Models. Scheduled for press Ja. 1993, J. For. Engr., 8 p.
- IICA. 1994. Lineamientos para diagnosticar el uso actual y manejo de los recursos naturales renovables en estudios sectoriales agropecuarios. Costa Rica, s.p.
- MITCHELL, J. 1998. Un bosque de billetes. *El Mercurio*, 6 de junio de 1998, p. D10.
- NORDHAUS, D. 1992. "An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Science*, 258: 1315-1319.
- PRIETO, A., M. LOPEZ. 1993. *Manual de ordenación de bosques*. Trad. de la 3ª ed. Paraninfo, Madrid, 261 p.
- SESSIONS, J. 1987. A heuristic algorithm for the solution of the variable and fixed cost transportation problem. In Proc.: the 1985 Symposium on System Analysis in Forest Resources. Univ. of Georgia, Athens, pp. 324-336.
- SESSIONS, J. 1992. Using network analysis for road and harvest planning. In Proc.: computer supported planning of roads and harvesting workshop. IUFRO Subject Groups 3.05 y 3.06. Feldafing, Germany, pp. 26-35.
- SESSIONS, J., G. PAREDES. 1987. "A solution procedure for the sort yard location problem in forest operations", *Forest Science*, Vol. 33 (3): 750-762.
- SESSIONS, J., J.B. SESSIONS. 1989. *Network II Manual*. Corvallis, 10 p.
- SHERALI, H., CH. LIU. 1990. "Identification of a Network Substructure and some algorithmic considerations for large-scale harvest scheduling problems", *Forest Science* Vol. 36 (3): 599-613.