

MODELOS DE PLANIFICACION FORESTAL BASADOS EN LA PROGRAMACION LINEAL. APLICACION AL MONTE “PINAR DE NAVAFRIA” (SEGOVIA)

L. DIAZ BALTEIRO

Area de Economía Agraria y Forestal. ETS Ingenierías Agrarias.
Avda. Madrid 57. 34071 Palencia

A. PRIETO RODRIGUEZ

Dpto. de Economía y Gestión. ETS Ingenieros de Montes.
Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid

RESUMEN

Este trabajo muestra que la aplicación a la ordenación de montes de métodos basados en herramientas analíticas, como la programación lineal, es no sólo factible, sino que puede proporcionar resultados muy interesantes al gestor forestal. Dado que en España tradicionalmente no se han empleado estas técnicas, se ha elegido un monte que ha sido ordenado con procedimientos tradicionales desde el siglo pasado, y se ha construido un modelo de planificación forestal basado en la programación lineal. El monte elegido, “Pinar de Navafría”, ha sido profusamente estudiado, con lo que se pueden comparar ambas metodologías.

Se han definido dentro del modelo cuatro funciones objetivo. Dos de ellas presentan un carácter marcadamente selvícola: maximizar el volumen y maximizar el volumen de chapa; mientras que las otras dos tienen una orientación económica: maximizar el valor actual neto y maximizar el flujo de caja de cada período. Además, se acompaña un análisis de sensibilidad para investigar la influencia de variaciones en la tasa de descuento elegida y en el precio esperado de la madera.

Las alternativas de manejo propuestas muestran tanto unas posibilidades como un turno superiores a los indicados siguiendo los métodos tradicionales. En resumen, puede decirse que los resultados obtenidos con los métodos clásicos de ordenación pueden considerarse casos particulares de los modelos de optimización planteados en este trabajo.

PALABRAS CLAVE: Ordenación de montes
Planificación forestal
Programación lineal
Economía forestal

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es mostrar cómo se pueden aplicar técnicas basadas en la programación lineal a la ordenación o gestión de montes. Para tener una idea de las diferencias que supone emplear estas técnicas en vez de las tradicionales, se ha procedido a comparar la ordenación de un monte bajo el método de tramos periódicos

Recibido: 24-6-98

Aceptado para su publicación: 9-7-99

permanentes, con la aplicación, a ese mismo monte, de métodos basados en herramientas analíticas optimizadoras.

Para dotar de una mayor solidez a los resultados obtenidos, se han definido cuatro funciones objetivo diferentes. Dos de ellas tienen una orientación típicamente forestal (maximizar el volumen total y el volumen de chapa), mientras que las otras dos se encuadran bajo aspectos económicos de la gestión de montes (maximizar el VAN o conseguir que la corriente de flujos de caja sea lo más homogénea y elevada posible). Mediante estos objetivos, y definiendo una serie de restricciones, se han construido una serie de modelos que han proporcionado unos resultados que se han comparado con los obtenidos en la novena Revisión del monte.

Antes de llegar a esta comparación, se ha procedido a realizar una breve presentación donde se sitúa el papel de la investigación operativa en la planificación forestal. Así mismo, también se ha dado un repaso a los escasos ejemplos existentes en España de aplicación de estas técnicas a la gestión forestal. A continuación, se ha justificado la elección del modelo empleado y se ha descrito con detenimiento. Por último, y antes de alcanzar los apartados que contienen tanto los resultados como las conclusiones, se ha procedido a realizar un análisis de sensibilidad sobre algunos parámetros que se habían tomado como invariables a la hora de realizar la planificación.

MATERIAL Y METODOS

La Investigación Operativa en la Planificación forestal

Cuando un forestal aborda el problema de cómo ordenar o gestionar¹ un determinado monte, se tiene que plantear numerosas cuestiones básicas relativas a la toma de decisiones: ¿Cuáles son los objetivos de la ordenación?, ¿Qué turno se va a emplear?, ¿Cuál será el plan de cortas previsto?, ¿Cómo se van a optimizar las inversiones?, etc. Como es sabido, la respuesta a estas y otras preguntas provoca efectos no sólo en la disposición actual de la masa, sino en las capacidades futuras del monte.

Para responder a esta serie de interrogantes se suelen emplear dos tipos de métodos bien distintos: unos corresponderían a aquellos métodos habitualmente empleados en nuestro país, y que emanan de la tradición forestal centroeuropea. Estos procedimientos se caracterizan por no emplear explícitamente ninguna herramienta optimizadora y por estar muy centrados en aspectos relacionados con la silvicultura, prestando poca atención a la naturaleza económica del problema. Por contra, existen otras prácticas, empleadas reiteradamente en otros países (Norteamérica, Escandinavia, Australia, etc.) que utilizan directamente herramientas típicas de cualquier problema de toma de decisiones. De forma muy esquemática, estos modelos consistirían en definir una función objetivo (mono o multicriterio), y maximizarla sujeta a un conjunto de restricciones. De esta manera, la gestión de montes en estos países es concebida como...*"el estudio y aplicación de técnicas analíticas para elegir aquellas alternativas de manejo que mejor reflejen los objetivos organizativos"* (Leuschner, 1990).

¹ A lo largo de este trabajo se toman como sinónimos los términos "ordenación", "gestión" o "manejo" de montes. Serían equivalentes al término anglosajón "Forest management".

Probablemente, esta distinción sea muy escueta, pero la intención de este trabajo no es la de teorizar entre las diferencias existentes entre ambas corrientes, ni prejuzgar que una sea mejor o peor que otra. Estos métodos analíticos prestan una atención mayor a la que generalmente se le concede en los proyectos de ordenación a los aspectos económicos del monte, pero esto no implica que la gestión de montes sea exclusivamente planificación económica (Madrigal, 1994).

Conviene precisar cuanto antes que la utilización de estas herramientas optimizadoras no asegura que se puedan contestar todas las preguntas que surgen al proceder a ordenar un monte, debido a su innata complejidad, sino que estos modelos proporcionan un conjunto de políticas que pueden ayudar al gestor a mejorar su toma de decisiones (Stirn, 1990). Esta idea entronca con la naturaleza de la ordenación clásica, concebida no como un fin, sino como un medio, un instrumento para una buena gestión (Dubordieu et al., 1993).

Actualmente, se puede afirmar que cada día resulta más complejo elaborar las decisiones en cuanto al manejo de los montes, debido, entre otras razones, a la mayor presión a la que están siendo sometidos. Esta presión se traduce, para el gestor, en que se demanda un manejo bajo usos múltiples, lo que le obliga a tener en consideración otros objetivos y/o otras restricciones además de los ya existentes. Esto conduce a una mayor complicación del problema. Afortunadamente, se puede afirmar que la investigación operativa responde a las necesidades que el planificador demanda, ya que está desarrollando continuamente nuevas técnicas, algoritmos, etc.; además, el rápido progreso de la informática permite abordar el problema con una mayor facilidad y velocidad. Así, aunque en la mayoría de las ocasiones la técnica utilizada es la programación lineal, diversos forestales han utilizado para sus análisis otras disciplinas de la investigación operativa. Por ejemplo, se acude en muchas ocasiones a la metodología de decisión multicriterio, en sus múltiples variantes: métodos discretos, continuos, interactivos, etc. En Romero (1989), Bernetti (1994), Tarp, Helles, (1995), se pueden encontrar rigurosas revisiones del uso de este tópico en la planificación forestal. En otras ocasiones, se ha recurrido a modelos de programación borrosa (Mendoza, Sprouse, 1989), a la programación dinámica (Williams, 1989), a modelos de Markov, modelos no lineales, modelos enteros, modelos de simulación, etc. Por otro lado, existen ya aplicaciones a la gestión forestal que utilizan técnicas como la inteligencia artificial (Brack y Marshall, 1992) o las redes neuronales (Kourtz, 1990). Weintraub y Bare (1996) revisan concienzudamente trabajos forestales en donde se aplican estos y otros métodos.

Una vez centrado el papel de la investigación operativa en la planificación forestal, conviene detenerse en el método de optimización más universalmente empleado en la planificación forestal, como es la programación lineal. Independientemente de su popularidad, hay que señalar que debido a sus limitaciones, algunas de las cuales se mostrarán en este trabajo, es un método no exento de críticas (Bare et al., 1984; Brack y Marshall, 1992). Antes de pasar a profundizar en el modelo de programación lineal que se ha elegido para su aplicación al monte de Navafría, conviene revisar los modelos de programación lineal utilizados en España para abordar problemas de planificación forestal.

Empleo de la Programación Lineal en la Planificación Forestal en España

Tradicionalmente, en España no se han utilizado con asiduidad en la ordenación de montes métodos basados en la programación lineal o en otras técnicas ya referidas de

la investigación operativa (técnicas multicriterio, programación dinámica, etc.). Uno de los primeros ejemplos de aplicación de estas prácticas se puede ver en Romero (1989). En este trabajo se aplica a un monte hipotético técnicas como la programación lineal o la programación compromiso, esta última ubicada dentro de las técnicas de decisión multicriterio. Cabe resaltar que aplicando esta última técnica, el autor consigue una solución eficiente considerando tres objetivos: maximizar el volumen, el VAN y minimizar las variaciones en cuanto a la producción de madera en cada uno de los períodos considerados.

En Bravo et al. (1996) se construye un modelo de programación lineal, con el fin de obtener el máximo volumen posible, haciendo especial hincapié (se especifican las cortas aclaratorias y finales) en las superficies que se regeneran en cada período y clase de edad. Se busca comparar los resultados obtenidos con el proyecto de ordenación correspondiente al monte en cuestión, y así se introducen restricciones que limitan el volumen a obtener en cada período a que sea menor que la posibilidad.

Estos mismos autores (Ramos et al., 1996) plantean también un problema de programación lineal a un monte hipotético (similar al utilizado por Romero, 1989) en el que por un lado se pretende minimizar el sacrificio de cortabilidad, y por otro maximizar el volumen de madera, sujetos ambos casos a ciertas restricciones.

Un ejemplo de aplicación en España de los modelos de planificación estratégica conocidos por Modelo I y Modelo II se puede ver en Díaz-Balteiro (1995). Estos modelos se aplican a un monte de *Pinus sylvestris* en el Sistema Central, en donde se toma como función objetivo el maximizar el valor actual neto. Así mismo, en este trabajo se emplean procedimientos de tipo multicriterio para elegir una alternativa óptima de manejo. Estos procedimientos son de tipo discreto (método AHP) o continuo (programación compromiso). En Díaz-Balteiro y Romero (1998a, 1998b) se profundiza en este último método, integrándolo en un procedimiento multicriterio junto a otras técnicas (programación por metas).

El Monte de Navarra

El Monte "Pinar de Navarra" se encuentra situado en la cara Norte del Sistema Central, dentro de la provincia de Segovia. Su ubicación dentro de esta cordillera se encuadra en lo que se conoce como el sector de Guadarrama. La cota altitudinal oscila entre los 1.300 y los 2.200 m. En cuanto a la cabida, se estima en 2.760 ha, de las que 2.504 se consideran como superficie forestal poblada. La propiedad del monte es pública, ya que pertenece a la Comunidad de Villa y Tierra de Pedraza. En concreto, se trata del monte de U.P. nº 98 de la provincia de Segovia. La especie principal es *Pinus sylvestris*, que se encuentra como especie dominante y principal en la práctica totalidad del monte. No obstante, es preciso indicar que se encuentran otras especies arbóreas, algunas de ellas introducidas (*Pinus uncinata*, *Larix europea*, *Picea abies*) y otras autóctonas (*Taxus baccata*). La productividad potencial forestal varía entre 4,5 y 6 m³ por hectárea y año.

Este monte comenzó a ser ordenado en 1895 por el método de Tramos Periódicos Permanentes, teniendo hasta la fecha nueve revisiones, una por decenio. El objetivo principal de la ordenación ha sido la ejecución de la posibilidad, y la obtención de una regeneración natural viable. El monte se ha dividido, desde un principio, en tres secciones, tres cuarteles por sección, y cinco tramos por cuartel. En la Tabla 1 se puede observar la evo-

TABLA 1
EVOLUCION DE LA ORDENACION DEL MONTE "PINAR DE NAVAFRIA"
Evolution of the management in "Pinar de Navafria" forest

Estudio	Fecha aprobación	Vigencia	Superficie		Existencias (n° de pies)		Existencias (en m³)		Posibilidad Ejecutada
			Pública	Arbolada	No métricos	Métricos	Existencias	Crecimiento	
Proyecto		1896-1906	2.723	2.367	sin datos	476.825	258.421		45.530
1ª Revisión	julio-1907	1907-1917	2.723	2.343	sin datos	579.266	290.201	28.990	46.750
2ª Revisión	mayo-1918	1918-1928	2.723	2.343	sin datos	559.469	298.672	45.536	53.031
3ª Revisión	noviembre-1927	1929-1938	2.723	2.492	sin datos	619.251	311.670	55.165	58.749
4ª Revisión	mayo-1940	1939-1948	2.723	2.543	sin datos	707.100	354.528	67.037	65.748
5ª Revisión	agosto-1949	1949-1958	2.723	2.481	478.386	664.254	377.058	74.280	71.418
6ª Revisión	abril-1959	1959-1968	2.723	2.492	546.464	718.412	449.540	98.364	90.092 (1)
7ª Revisión	noviembre-1969	1968-1978	2.760	2.533	606.513	722.676	494.736	122.012	112.928
8ª Revisión	***	1979-1988	2.760	2.505	774.134	736.532	505.058	113.983	115.541
9ª Revisión	diciembre-1991	1989-1998	2.760	2.505	925.109	743.752	515.140	128.534	135.183
TOTAL									767.366

(1) Posibilidad aprobada por la superioridad.

(2) No incluye 2.780 m³ cortados para la construcción de vías de saca, no contabilizables a efectos de posibilidad.

lución de la ordenación del monte, atendiendo a variables como las existencias y la posibilidad. Los datos empleados en los siguientes apartados han sido extraídos de la novena revisión del proyecto de ordenación (Prieto *et al.*, 1991).

Justificación y Descripción del Modelo

De los dos tipos de modelos definidos tradicionalmente en la literatura forestal (Johnson y Scheurman, 1977) se ha elegido el conocido como Modelo I. La diferencia más importante que existe entre el Modelo I y el II se refiere al modo de agrupar las distintas unidades de gestión o manejo (en el caso que nos ocupa, serían tramos). El Modelo I obliga a definir en el momento inicial las variables de decisión, que deberán abarcar todos los posibles regímenes de manejo a considerar. Una vez definidos, permanecerán inalterables a lo largo del turno de transformación. Cada una de estas prescripciones engloba aspectos como la edad de corta o los distintos tratamientos culturales a realizar; es decir, que al elegir una prescripción determinada se está asumiendo una corriente futura de inputs y outputs diferente de las demás. Esta corriente se reflejará en un valor numérico, que será el coeficiente asociado a cada prescripción en la función objetivo. Una vez definidas las prescripciones, se construye, siguiendo el esquema clásico de la programación lineal, la función objetivo introduciendo las prescripciones adecuadas a cada caso. Se procedería de la misma forma con las restricciones, y a continuación se resolvería el problema.

La razón fundamental para elegir en el monte de Navafría el realizar la planificación forestal según el Modelo I, ha sido la mayor facilidad que introduce a la hora del seguimiento a lo largo del tiempo de los diferentes tramos, al mantenerse la misma superficie fija. Probablemente esto conlleva el introducir un mayor número de variables (300 prescripciones diferentes) y un número inferior de restricciones, pero también presenta la ventaja de permitir una mayor facilidad tanto a la hora de localizar superficies de corta, si se quiere comparar los resultados obtenidos con los existentes en las revisiones del proyecto de ordenación.

Antes de aplicar el método esbozado anteriormente es conveniente describir una serie de hipótesis de partida. En primer lugar, es preciso aclarar que se tomará como forma de masa en su futuro la masa regular, con *Pinus sylvestris* como especie principal. La función objetivo se definirá explícitamente en cada ocasión, pero en un principio será monocriterio. Se considerará un horizonte de planificación o turno de transformación de 100 años, dividido en 10 períodos (la mitad del período de regeneración utilizado en el proyecto de ordenación), y las posibles cortas se referirán al punto medio de cada período (cinco años).

Para establecer el turno no se ha tomado una edad de corta fija (en la 9ª revisión del proyecto de ordenación era de 100 años), sino que se ha elegido un amplio abanico que va desde los 80 a los 140 años. Un turno de 80 años se puede justificar atendiendo a razones tanto productivas (a esa edad incluso las peores calidades ya producen madera cuyo destino es el aserrío) como biológicas (se puede lograr perfectamente la regeneración natural). El límite superior intenta abarcar una edad que, aunque no se fundamenta económicamente, se puede justificar atendiendo a ciertos aspectos no productivos (recreativos, paisajísticos) y a criterios tecnológicos, ya que algunos estudios muestran que conforme el turno se alarga se producen mejoras en la calidad tecnológica de la madera

(aumento en la proporción de volumen destinado a chapa), lo que conlleva aumentos en el precio. Estos trabajos (Montero et al., 1992) fijan el turno mínimo de la especie en esta zona en torno a los 140 años. No se ha considerado la posibilidad de alargarlo, debido a la mayor probabilidad de que a estas edades la masa comience a presentar síntomas de decrepitud y se desestabilice.

Asimismo, es preciso subrayar que no se han contabilizado los datos debidos a la realización de claras en lo que se refiere tanto a ingresos posibles como a volúmenes obtenidos. Únicamente se contabilizan aquellos que se refieren a cortas finales. Ello no significa que no se prevea la realización de claras y otras operaciones culturales en el monte. También se asume que, en el caso de que la función objetivo sea maximizar el VAN, los precios tanto de los factores productivos como de los productos obtenidos crecen al mismo ritmo durante el horizonte de planificación; que el precio de venta de la madera no se ve influenciado por la cantidad de la misma que se vende en cada período, y que no se va a asumir ningún coste en cuanto al transporte de los productos a los centros de transformación.

A continuación se va a proceder a definir las distintas prescripciones (posibles manejos que una unidad de manejo puede alcanzar a lo largo del horizonte de planificación, Davis y Johnson, 1986) definidas siguiendo el Modelo I, que ya incorporan los supuestos que se acaban de precisar. Cada una de ellas se asimila a un posible manejo a lo largo del horizonte de planificación, partiendo de las clases de edad y calidades de estación iniciales. La notación seguida para clasificar estas prescripciones se muestra en el Anexo 1. En la Tabla 2 se recogen las prescripciones de la primera sección del monte (cuartel A), además de la superficie, calidad de estación y edad de cada tramo. Tomando la primera de ellas, X_{IA11} , se comprueba que el primer índice representa la sección del monte (existen tres); la letra A también tiene significado dasocrático, ya que se refiere al cuartel (hay tres cuarteles por cada sección); el número romano I se refiere al tramo (cinco tramos por cada sección); la última cifra representa la prescripción correspondiente. Por ejemplo, en la Tabla 2 se muestran los 5 manejos diferentes (uno por tramo) y para cada manejo se define un número de prescripciones de tal forma que se cubra todo el abanico de edades de corta final posibles.

Una vez definidas las variables a utilizar (las prescripciones), el siguiente paso es calcular los coeficientes (C_{ijkl}) que acompañan a dichas variables en la función objetivo (ver Anexo I); es decir, dado que el tomar una prescripción conlleva que el VAN, volumen, o el objetivo considerado alcance un valor que depende, a igualdad de otros factores, del turno asociado a dicha prescripción, es necesario calcular para cada prescripción el valor del objetivo que se intenta maximizar.

Como función objetivo se han considerado las siguientes:

- VAN: se maximiza el valor actual neto asociado a todo el monte mediante la suma de los VAN de cada una de las prescripciones.
- VOLUMEN: en este caso se maximiza la suma de los volúmenes asociados a cada una de las prescripciones a lo largo de los 10 períodos.
- CASH-FLOW: se intenta que el cash-flow (diferencia entre los cobros y pagos esperados) que se produce en un período sea máximo. Se pretende obtener una corriente homogénea de flujos de caja a lo largo de los distintos períodos, y que además sea máxima.

TABLA 2
PRESCRIPCIONES DEL CUARTEL A LA DE LA SECCION 1
DEL MONTE “NAVAFRIA”
Prescriptions in “Pinar de Navafría” stand A-1

Sección 1																	
Cuartel	Tramo	Superficie	Calidad	Edad	Posibles prescripciones	Cortas durante el horizonte de actuación edad											
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	final	
A	I	80,67	20	80	X _{1AII1}	C										95	
					X _{1AII2}	C								C		15	
					X _{1AII3}	C										C	5
					X _{1AII4}		C									C	5
					X _{1AII5}		C										85
					X _{1AII6}			C									75
					X _{1AII7}				C								65
					X _{1AII8}					C							55
					X _{1AII9}								C				45
					X _{1AII10}									C			35
	II	91,55	23	50	X _{1AIII1}				C							65	
					X _{1AIII2}					C						55	
					X _{1AIII3}						C					45	
					X _{1AIII4}							C				35	
					X _{1AIII5}								C			25	
					X _{1AIII6}									C		15	
					X _{1AIII7}										C	5	
III	53,29	17	30	X _{1AIII1}						C					45		
				X _{1AIII2}							C				35		
				X _{1AIII3}								C			25		
				X _{1AIII4}									C		15		
				X _{1AIII5}										C	5		
				X _{1AIII6}											130		
IV	48,09	20	130	X _{1AIV1}	C										95		
				X _{1AIV2}	C								C		15		
				X _{1AIV3}	C									C	5		
				X _{1AIV4}		C									85		
				X _{1AIV5}		C								C	5		
V	71,26	17	110	X _{1AV1}	C										95		
				X _{1AV2}	C								C		15		
				X _{1AV3}	C									C	5		
				X _{1AV4}		C									85		
				X _{1AV5}			C							C	5		
				X _{1AV6}				C							75		
				X _{1AV7}					C						65		

La calidad se refiere a los datos de las Tablas de Producción de Rojo y Montero (1996).

La letra “C” indica el período en que se produce la corta, asumiendo que se produce a la mitad del período.

- **VOLUMEN DE CHAPA:** se intenta maximizar únicamente la suma del volumen de madera que se pueda destinar a la obtención de chapa, debido al mayor valor de estas trozas.

A continuación, es necesario precisar las distintas restricciones que se van a introducir en el modelo. Estas restricciones se dividen entre aquellas que son endógenas, las que aseguran que la suma de los valores de cada prescripción no supere la superficie que tiene cada tramo en el momento inicial, y las restricciones exógenas, que dependerán de los objetivos que se deseen alcanzar. En este modelo se han definido las siguientes restricciones exógenas:

- **FLUJO DE VOLUMEN:** suele ser la condición más comúnmente introducida en los modelos de planificación forestal. En este caso se ha considerado su cumplimiento estricto; es decir, que el volumen de madera obtenido en cada período sea el mismo. A la hora de definir las restricciones, se suelen utilizar a efectos operativos identidades contables (esto es, artificios matemáticos que nos permiten obtener directamente el valor de ciertas variables del modelo). Las identidades contables que engloban a los volúmenes producidos en cada período se definen como H_1, H_2, \dots, H_{10} .
- **INVENTARIO FINAL:** con esta restricción se pretende evitar que, una vez finalizado el turno de transformación elegido, la estructura del inventario final que presente la masa no sea deseable. Al igual que en el caso del flujo de volumen, existen diversas formas de formular esta restricción, en este caso se ha optado por obligar a que dicho inventario sea por lo menos igual al existente en cada sección del monte cuando se realizó la 9ª Revisión del proyecto de ordenación.
- **REGULACION:** otra forma de garantizar una buena estructura del monte, una vez que haya concluido esta planificación, es la de obligar a que cada clase de edad ocupe la misma superficie. Si se considera como intervalo para las clases de edad los 20 años, para articular esta condición es necesario que la superficie perteneciente a cada clase de edad (definidas por las identidades contables A_1, \dots, A_5) sean iguales a la quinta parte de la superficie total del monte, es decir a 500,8 ha.
- **IGUALDAD DE CASH-FLOW:** una aspiración lógica para el centro decisor podría ser la de obtener una cierta homogeneidad en los flujos de caja ("cash-flow"). Debido a su titularidad municipal, parece sensato argumentar que si nos referimos al monte de Navafría, los responsables locales aspiren a obtener en cada período un cash-flow que sea máximo (esa aspiración se traduciría en una función objetivo maximizar el cash-flow de un período), y que no disminuya a lo largo de los sucesivos períodos. Así pues, se establecerán identidades contables F_1, \dots, F_{10} para calcular el cash-flow en cada período, y se obligarán a que sean iguales. Las expresiones matemáticas de todas estas restricciones y funciones objetivo se pueden encontrar en el Anexo I.

Antes de finalizar este apartado es necesario precisar algunos aspectos asociados con el cálculo de los distintos coeficientes asociados a los objetivos y restricciones. En primer lugar, hay que referirse a los distintos parámetros que intervienen en el cálculo del VAN. Como en todo modelo de planificación a largo plazo, la elección de la tasa de descuento

presenta una importancia notable, tanto a efectos de VAN como de los cash-flow obtenidos en cada período. En el modelo que estamos considerando, se ha optado por tomar una tasa de descuento real del 2 %. Para justificar la elección de esta tasa puede acudir a dos criterios: la tasa social de preferencia en el tiempo, que englobaría la mayor o menor impaciencia del conjunto de la sociedad hacia el consumo presente frente al consumo futuro; y el coste de oportunidad del capital. Según los estudios realizados en otros países (Kula, 1988) una tasa del 2 % es perfectamente asumible. Otros autores se inclinan, ante la complejidad de su estimación, en equipararla a la tasa de retorno de la deuda pública a largo plazo. Aunque esta tasa de retorno ha fluctuado mucho en los últimos años en España, actualmente también proporciona un valor similar al elegido. De todas formas, se ha efectuado un análisis de sensibilidad para mostrar los efectos de una variación en este parámetro.

Siguiendo con aspectos de índole económica, es preciso conocer en cada momento los cobros y pagos para el cálculo de los flujos de caja. En cuanto a los cobros, es preciso aclarar que sólo se van a considerar los que se obtienen por la venta de la madera procedente de las cortas finales. Para el cálculo del precio del m³ según clase diamétrica, se ha partido de un precio de 8.000 pta/m³ para árboles que no produzcan madera de chapa. Conforme aumenta el diámetro, el porcentaje de la madera que pueda tener ese privilegiado destino se eleva, por lo que dicho precio base se multiplica por un precio índice, siguiendo el trabajo de Montero *et al.* (1992). En cuanto a otros cobros (e.g. subvenciones) y pagos, se ha acudido a la última revisión y se ha tomado el valor de las mejoras, tanto realizadas con cargo a los presupuestos del estado, como las realizadas gracias al fondo de mejora. Se ha promediado el valor de estos gastos por hectárea y año, y ese es el valor que se ha introducido en el análisis. Además, hay que tener en cuenta que las mejoras realizadas con cargo a los presupuestos del estado se han tomado como si fueran una subvención.

Para abordar el problema que nos ocupa, es imprescindible conocer los volúmenes de madera que se van a obtener en el monte a lo largo del turno de transformación. Estas cifras se han obtenido, en un principio, a partir del inventario efectuado en la última revisión del proyecto de ordenación (Prieto *et al.*, 1991). Sin embargo, el inventario se ha realizado en aquellos tramos en los que se ha formado masa nueva desde que se comenzó la ordenación, y que van a ser cortados en la próxima revisión, es decir, los tramos I. Por lo tanto, en dicho inventario no existían tramos con edades tan elevadas como las consideradas en este análisis (hasta 150 años). Para solucionar este problema, se han ajustado unas funciones que correlacionan la edad y el volumen, pero introduciendo para esas edades valores (modificados según la relación del área basal real y la de la tabla) de las tablas de producción del pino silvestre en la Sierra de Guadarrama (Rojo, Montero, 1996). En la Tabla 3 se recogen estas tarifas volumen-edad, así como su coeficiente de correlación.

RESULTADOS

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos al combinar las distintas funciones objetivo con las restricciones anteriormente definidas. Con el fin de presentar estos resultados de la manera más clara posible, se va a incluir cada función objetivo en una

sección independiente.

TABLA 3
TARIFAS VOLUMEN-EDAD
Age-Volume tariff table

Calidad	Tarifa	R ²
17	$V = -0,0002 \cdot T^3 + 0,0514 \cdot T^2 - 0,9214 \cdot T + 33,961$	0,91
20	$V = -0,00004 \cdot T^3 + 0,0017 \cdot T^2 + 3,5869 \cdot T - 12,277$	0,81
23	$V = -0,0001 \cdot T^3 + 0,0139 \cdot T^2 + 3,9843 \cdot T + 0,3865$	0,94
26	$V = -0,00002 \cdot T^3 - 0,0541 \cdot T^2 + 13,523 \cdot T - 239,19$	0,92
29	$V = -0,0001 \cdot T^3 - 0,0111 \cdot T^2 + 8,7215 \cdot T - 70,557$	0,98

V = Volumen (m³/ha) y T = Edad (años).

VAN

Los resultados cuando la función objetivo sea maximizar el VAN obtenido a través de la corriente de ingresos y gastos definida anteriormente, se exponen en la Tabla 4. Se han considerado cinco posibilidades o alternativas distintas:

- maximizar el VAN sin ninguna restricción (columna “Base”)
- maximizar el VAN bajo la restricción de igualdad de volumen (columna “Igual vol.”)
- maximizar el VAN bajo la restricción de inventario final (columna “Inv. final”)
- maximizar el VAN bajo la restricción de “regulación” (columna “Regulación”)
- maximizar el VAN sujeto simultáneamente a las tres restricciones (columna “Reg./Igual vol./Inv. fin.”)

En la Tabla 4 además de los valores de las identidades contables que representan tanto a la función objetivo como a las restricciones correspondientes a las 5 alternativas que se acaban de citar, se incorporan los valores que alcanzan las otras funciones objetivo consideradas (volumen, cash-flow, volumen de chapa), así como la disminución de la función objetivo al introducirse alguna de las restricciones consideradas.

La columna encabezada por “Base” acoge, dentro de la citada tabla, al caso en que no se impone ningún tipo de restricción exógena. Esta circunstancia lleva a obtener un VAN elevado (7.785·10⁶ ptas.), pero a costa de no cumplir ninguna otra condición. Así, el asumir esta alternativa implica que al final del turno de transformación no exista ninguna masa de la clase de edad superior (80-100 años), y que se llegue a un inventario final menor que la mitad del existente en el momento inicial. Por último, se observa (ver última fila de la Tabla 4) que el turno medio de la primera corta ronda los 100 años.

TABLA 4
RESULTADOS CUANDO SE MAXIMIZA EL VAN

Results obtained when NPV is maximised

i = 2 %	Base	Igual vol.	Inv. final	Regulación	Reg./igual vol./inv. fin.
VAN (· 10⁶ pta)	7.785	6.146 78,94%	7.475 96,02%	7.213 92,65%	5.149 66,14%
Regulación (ha)					
A1	0	0	657	501	501
A2	272	600	557	501	501
A3	343	527	376	501	501
A4	324	628	146	501	501
A5	1.565	749	767	501	501
Igualdad volumen (m³)					
H1	363.083	129.397	363.083	327.774	110.385
H2	246.383	129.397	204.209	122.206	110.385
H3	20.973	129.397	67.832	104.676	110.385
H4	104.933	129.397	146.681	101.420	110.385
H5	81.354	129.397	49.867	171.673	110.385
H6	33.605	129.397	75.118	23.848	110.385
H7	90.954	129.397	22.813	108.188	110.385
H8	17.873	129.397	17.871	51.302	110.385
H9	40.155	129.397	168.059	15.575	110.385
H10	478.379	129.397	120.934	203.715	110.385
Inventario final (m³)					
F1	59.082	134.156	190.117	183.366	190.117
F2	94.948	159.585	192.340	178.871	192.340
F3	72.898	98.179	132.720	137.225	132.720
Cash Flow (· 10⁶ pta)					
CASH FLOW 1	3.813	1.355	3.813	3.520	989
CASH FLOW 2	1.970	1.052	1.675	1.050	928
CASH FLOW 3	0	873	319	588	724
CASH FLOW 4	586	654	792	564	571
CASH FLOW 5	332	605	172	761	500
CASH FLOW 6	76	532	214	48	415
CASH FLOW 7	217	382	21	273	357
CASH FLOW 8	0	288	0	67	257
CASH FLOW 9	29	222	294	0	225
CASH FLOW 10	763	183	177	343	184
VOLUMEN TOTAL (m³)	1.477.713	1.293.961	1.236.462	1.230.386	1.103.84
VOLUMEN CHAPA (m³)	209.341	218.343	180.224	203.061	206.739
TURNO MEDIO	99	116	98	104	123

En la fila tercera se expresa el porcentaje del VAN, con respecto a la alternativa base, para cada restricción correspondiente.

El asumir la restricción de igualdad de volumen en cada período supone (columna “Igual vol.”) renunciar a un 21 % del VAN, a cambio de obtener un flujo

de volumen de 129.397 m³/período. Con esta alternativa tampoco se alcanza un inventario final comparable al inicial (un 24 % menor), y la distribución superficial de las clases de edad resulta algo más equilibrada que el caso anterior, aunque la clase primera sigue sin estar representada en la solución. Como se puede apreciar claramente, el que se produzca una igualdad en los flujos de volumen no implica que los cash-flow sean equivalentes en cada período debido a la existencia del descuento. Con esta restricción se obtiene un volumen total inferior en un 12 %, pero el volumen de madera de chapa es ligeramente mayor. Por último, a diferencia del caso anterior, el turno medio resulta sensiblemente más elevado (116 años), y se puede comprobar que la superficie media de corta por prescripción incluida en la solución es menor.

En la tercera alternativa se obtiene un VAN casi igual al de la primera, pero con una distribución de clases de edad más homogénea. El resto de las restricciones sigue sin cumplirse. Por otro lado, se obtiene aproximadamente cerca de un 15 % menos tanto de volumen total como de volumen de chapa.

Cuando se introduce en el problema la condición de “Regulación” se reduce el VAN en un 7 %. Aunque el flujo de volumen no presenta, ni mucho menos, un comportamiento similar, la condición de inventario final alcanza valores muy cercanos a su pleno cumplimiento. Por contra, el volumen total es un 17 % menor que en la alternativa primera.

En la última alternativa se presentan conjuntamente las tres restricciones, y lo primero que se puede decir, además de que la solución es factible, es que el VAN se reduce sensiblemente (un 34 %). Además, la igualdad del flujo de volumen se consigue con una cantidad menor que en la alternativa 2 (un 15 % menos). Mientras que con respecto al volumen de chapa apenas se produce variación con respecto a la primera alternativa, el volumen total se reduce en la cuarta parte. Para llegar a esta solución el programa elige prescripciones con un turno elevado (el turno medio se acerca a los 125 años).

Volumen

A continuación, y siguiendo el mismo procedimiento empleado cuando la función objetivo es maximizar el VAN, se presentan cinco alternativas en la Tabla 5, con las mismas restricciones que en el subapartado anterior. En este caso la función a maximizar es el volumen, no el VAN.

Cuando se considera la alternativa primera (o columna “Base” en la Tabla 5), se observan unos valores para las diferentes restricciones que siguen la misma tónica que cuando el objetivo era obtener el máximo VAN, sólo que todavía se acentúan más tanto las divergencias en los flujos de volumen, como en las superficies ocupadas por cada clase de edad (el 88 % pertenece a la clase de edad de 0-20 años). Esta distribución tan sesgada trae también como consecuencia que el inventario final sea prácticamente inapreciable con respecto al inicial. Para obtener esta solución, el algoritmo intenta elegir aquellas prescripciones que presentan dos cortas (más de la mitad presentan esta característica), lo que explica esos valores en las identidades contables que muestran las restricciones. A diferencia de cuando se maximizaba el VAN, aquí el turno medio de las prescripciones que entran en la solución supera los 110 años.

TABLA 5
RESULTADOS CUANDO SE MAXIMIZA EL VOLUMEN TOTAL

Results obtained when volume is maximised

	Base	Igual vol.	Inv. final	Regulación	Reg./igual vol./inv. fin.
Volumen total (m³)	1.563.848	1.298.126 83,01%	1.258.412 80,47%	1.276.733 81,64%	1.103.869 70,59%
Regulación (ha)					
A1	0	0	291	501	501
A2	71	601	696	501	501
A3	48	505	361	501	501
A4	188	684	69	501	501
A5	2.198	715	1.087	501	501
Igualdad volumen (m³)					
H1	408.629	129.813	403.259	144.403	110.385
H2	181.054	129.813	42.808	306.509	110.385
H3	16.030	129.813	150.939	13.145	110.385
H4	13.312	129.813	159.502	167.010	110.385
H5	13.388	129.813	73.147	13.388	110.385
H6	12.573	129.813	59.378	226.295	110.385
H7	77.361	129.813	13.906	12.831	110.385
H8	28.675	129.813	14.131	158.496	110.385
H9	46.865	129.813	278.081	18.472	110.385
H10	765.942	129.813	63.280	216.165	110.385
Inventario final (m³)					
F1	14.700	146.878	190.117	164.482	190.117
F2	27.243	147.802	192.340	120.808	192.340
F3	32.624	105.459	132.720	133.159	132.720
VAN (· 10⁶ pta)	7.213	6.111	7.230	6.601	5.104
Cash Flow (· 10⁶ pta)					
CASH FLOW 1	4.132	1.360	4.125	1.530	989
CASH FLOW 2	1.458	1.050	228	2.659	928
CASH FLOW 3	0	881	1.046	0	724
CASH FLOW 4	0	647	848	816	571
CASH FLOW 5	0	626	282	0	516
CASH FLOW 6	0	494	155	868	368
CASH FLOW 7	245	359	0	0	350
CASH FLOW 8	50	308	0	364	278
CASH FLOW 9	70	207	476	0	209
CASH FLOW 10	1.258	180	70	365	172
VOLUMEN CHAPA (m³)	234.869	210.269	172.813	211.992	198.208
TURNIO MEDIO	112	116	101	112	123

En la fila tercera se expresa el porcentaje del volumen total, con respecto a la alternativa base, para cada restricción correspondiente.

Al introducir en el análisis la condición de igualdad en el flujo de volumen correspondiente a cada período, se observa también una situación similar a la que se presentaba cuan-

do la meta era maximizar el VAN: el volumen en cada período es prácticamente el mismo, así como las identidades contables relativas a la condición de regulación y el inventario final.

Centrándonos ya en el caso de que se active la condición del inventario final, se puede apreciar que sufre la función objetivo una reducción cercana al 20 %. Curiosamente, el asumir esta restricción supone, como se acaba de ver, renunciar a una cantidad significativa de volumen, pero esta circunstancia hace que el VAN se incremente ligeramente con respecto al caso base. El volumen de chapa, en cambio, sufre una reducción superior a la cuarta parte. La solución a esta alternativa presenta un turno medio sensiblemente menor que en los dos casos anteriores (100 años), y también con un porcentaje alto de prescripciones con dos cortas.

Cuando se hace efectiva la restricción de regulación, la función objetivo desciende, con respecto al caso "Base" un 20 %. Los flujos de volumen en cada período siguen siendo bastante dispares, y el inventario final se acerca al inicial (81 %), cumpliéndose la condición en la sección 3.

Por último, cuando se introducen las tres condiciones a la vez, se obtiene un resultado que comparándolo con el caso homólogo cuando se maximiza el VAN, resulta prácticamente idéntico, en cuanto al flujo de volumen, y al VAN. También la composición de los flujos de caja resulta muy parecida en ambos casos. Si comparamos esta alternativa con la primera, observamos que el descenso en la función objetivo ronda el 30 %, cifra similar al descenso en el VAN. El volumen de chapa disminuye menos (un 16 %), y el turno medio es superior a los 120 años.

Cash-Flow

En este caso el problema se reduce a maximizar el cash-flow que se produce en cada uno de los períodos, con la restricción de que éste no disminuya de un período a otro. Se ha planteado el problema bajo estas hipótesis, y el resultado muestra, por primera vez en este trabajo, una solución no factible. Es decir, que no existe ninguna combinación de prescripciones que produzcan una solución compatible con la idea de obtener un cash-flow idéntico en cada período. La razón que subyace detrás de esta situación es la presencia del descuento. El obtener unos flujos de caja descontados, y que sean iguales, obliga a encontrar una secuencia de cortas que sea creciente, y que además cumpla las restricciones endógenas. Como es sabido, uno de los problemas del descuento radica en que a partir de 40 o 50 años el valor descontado de un ingreso que se produce en ese período se reduce en gran manera. Para solventar este problema, el algoritmo intenta en esos períodos futuros agrupar un mayor número de prescripciones que presenten cortas finales a esas edades, pero la exigencia es tan grande que llega un momento en que se le agotan las posibilidades y por eso se produce una solución no factible. Hay que señalar que se ha respetado una restricción interna del paquete informático utilizado, en el sentido de que no se permite que las variables de decisión tomen valores negativos en la solución, por lo que en ningún período se produce un cash-flow negativo, aunque en algunos casos es nulo.

Con el fin de llegar a una solución factible, y que ésta presente unos flujos de caja que, aunque no sean iguales, sí sean lo más parecidos, se ha ido relajando paulatinamente la restricción de igualdad de cash-flow hasta llegar a una solución viable. Así, se ha ido permitiendo que el incumplimiento de la igualdad de cash-flow entre períodos sea igual a un determinado porcentaje. Realizando este proceso de unidad en unidad, se ha obtenido una solución factible cuando el cumplimiento alcanza el 86 %. Esto implica que el cash-flow entre dos períodos sucesivos no puede diferenciarse en más de un 14 % (Tabla 6).

TABLA 6
RESULTADOS CUANDO SE MAXIMIZA EL CASH-FLOW
Results obtained when the cash flow is maximised

i = 2 %	Base
Grado de cumplimiento	86 %
Cash Flow ($\cdot 10^6$ pta)	
CASH FLOW 1	1.006
CASH FLOW 2	865
CASH FLOW 3	744
CASH FLOW 4	640
CASH FLOW 5	550
CASH FLOW 6	473
CASH FLOW 7	407
CASH FLOW 8	350
CASH FLOW 9	301
CASH FLOW 10	259
Regulación (ha)	
A1	0
A2	560
A3	406
A4	601
A5	937
Igualdad volumen (m³)	
H1	102.591
H2	107.216
H3	113.520
H4	126.306
H5	111.238
H6	115.908
H7	136.061
H8	141.188
H9	153.649
H10	176.205
Inventario final (m³)	
F1	145.257
F2	95.955
F3	96.454
VAN ($\cdot 10^6$ pta)	5.597
VOLUMEN TOTAL (m³)	1.283.894
VOLUMEN CHAPA (m³)	226.789
TURNO MEDIO	122

Se aprecia que, bajo estas condiciones, el cash-flow resulta decreciente en todos los períodos, llegando a un valor en el décimo período que es aproximadamente la cuarta

parte del existente en el primero. La influencia del descuento se aprecia observando los flujos de volumen, que resultan, sobre todo al final del turno de transformación, crecientes. Así, el volumen que se corta en el último período es un 70 % mayor con respecto al primero. Es decir, que se obtiene para ese período final, con respecto al inicial, un flujo de caja sensiblemente menor (cuatro veces menos), con unas cortas que duplican el volumen obtenido.

Volumen de Chapa

En este caso, la función objetivo consiste en maximizar el volumen de madera obtenido del monte que se puede dedicar a chapa. Procediendo como en los casos anteriores, en la Tabla 7 se encuentran los valores que han alcanzado las alternativas consideradas cuando se maximiza este objetivo.

Cuando se maximiza la función objetivo carente de restricciones, se obtiene un volumen de chapa de 258.510 m³, con una situación a final del turno de transformación en cuanto a inventario final y regulación muy desequilibrada, similar a la que presentaban los otros objetivos en alternativas análogas. El inventario final representa tan sólo el 21 % del inicial. El turno medio de las prescripciones que componen la solución es, como cabría esperar, bastante elevado (cercano a los 125 años).

En la citada Tabla 7 se pueden apreciar que los rangos de variación al aplicar las distintas restricciones por separado son similares a los que se obtenían cuando se maximizaba el volumen total, diferenciándose en que el VAN es ligeramente inferior para cada alternativa, mientras que el turno suele ser algo mayor. Cuando se consideran conjuntamente las tres restricciones, se obtiene una solución muy parecida a las de anteriores funciones objetivo bajo las mismas características. Estas restricciones provocan que el volumen de chapa se reduzca aproximadamente en un 20 %, cifra similar a la reducción que se presenta en el VAN, pero inferior a que se produce en el volumen total (25 %). En cuanto a las prescripciones que forman esta solución, cabe decir que presentan un turno medio muy alto (125 años), y únicamente tres de las 58 que entran en la solución permiten dos cortas finales.

Comparación con las Revisiones del Proyecto de Ordenación

En este apartado se pretende cotejar de alguna manera los valores aquí obtenidos para los distintos objetivos con los datos que se reflejan en la 9ª Revisión del proyecto de ordenación del monte, así como en revisiones anteriores. Es necesario aclarar que la comparación, en muchas ocasiones, presenta dificultades derivadas de la distinta naturaleza de ambos trabajos. Así, el horizonte temporal de cada revisión (10 años) es diferente del que se ha considerado en el modelo anteriormente expuesto (100 años). Otra barrera que impide una homologación inmediata entre ambos procedimientos es la carencia de cálculos sobre el VAN en cada revisión.

Comenzando por el volumen, en la Figura 1 se compara la posibilidad que el proyecto y las sucesivas revisiones han propuesto para el monte, con algunos resultados obtenidos en el apartado anterior. Es preciso aclarar que en el modelo de planificación que aquí se ha seguido no se han tenido en cuenta otro tipo de cortas que no fueran cortas finales

TABLA 7
RESULTADOS CUANDO SE MAXIMIZA EL VOLUMEN DE CHAPA
Results obtained when veneer volume is maximised

	Base	Igual vol.	Inv. final	Regulación	Reg./igual vol./inv. fin.
Volumen chapa (m³)	258.510	224.378 86,80 %	221.786 85,79 %	225.232 87,13 %	208.439 80,63 %
Regulación (ha)					
A1	0	160	754	501	501
A2	293	580	233	501	501
A3	62	582	557	501	501
A4	312	557	244	501	501
A5	1.838	625	716	501	501
Igualdad volumen (m³)					
H1	291.116	125.121	306.800	199.977	109.667
H2	125.217	125.121	111.146	156.878	109.667
H3	21.678	125.121	13.145	13.403	109.667
H4	84.693	125.121	110.548	213.065	109.667
H5	13.387	125.121	98.177	16.324	109.667
H6	14.424	125.121	149.255	193.289	109.667
H7	64.896	125.121	80.492	16.247	109.667
H8	64.823	125.121	44.008	217.511	109.667
H9	147.075	125.121	98.284	12.777	109.667
H10	637.846	125.121	171.497	194.674	109.667
Inventario final					
F1	56.080	150.700	190.117	185.989	190.117
F2	23.508	133.362	192.340	133.959	192.340
F3	28.523	132.110	132.720	126.907	132.720
VAN (· 10⁶ pta)	6.372	5.957	6.582	6.308	5.135
Cash Flow (· 10⁶ pta)					
CASH FLOW 1	3.170	1.305	3.294	2.178	1.029
CASH FLOW 2	1.058	1.025	821	1.220	902
CASH FLOW 3	36	805	0	0	716
CASH FLOW 4	359	663	665	1.252	565
CASH FLOW 5	0	545	401	0	480
CASH FLOW 6	0	514	607	782	422
CASH FLOW 7	154	359	232	0	341
CASH FLOW 8	141	303	89	550	264
CASH FLOW 9	336	239	187	0	218
CASH FLOW 10	1.118	200	286	328	198
Volumen total (m³)	1.465.184	1.251.214	1.183.362	1.234.164	1.096.671
Turno medio	124	118	104	110	125

En la fila tercera se expresa el porcentaje del volumen de chapa, con respecto a la alternativa base, para cada restricción correspondiente.

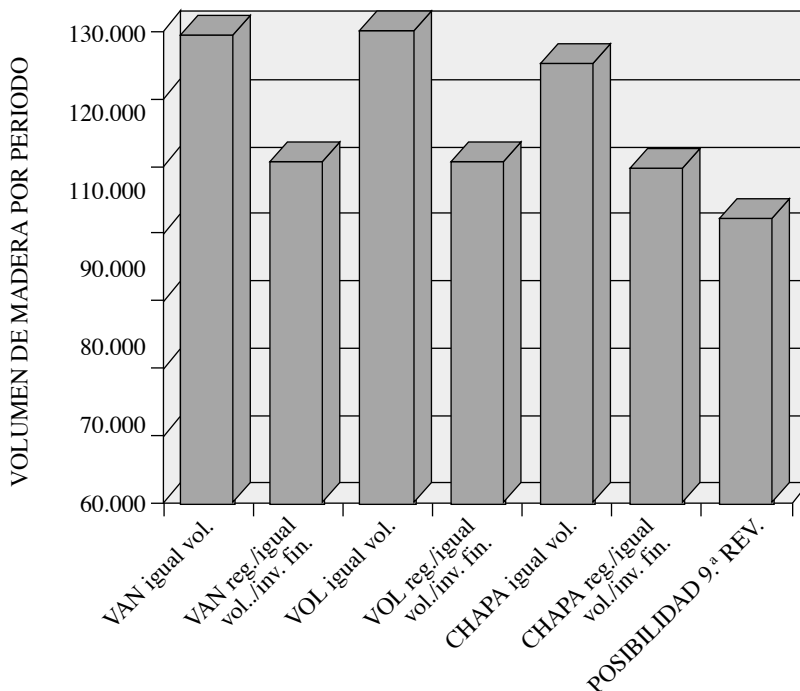


Fig. 1.—Comparación de los flujos de volúmenes de distintas alternativas con la posibilidad del monte
Comparison among harvest flow of each alternative with forest's actual cutting plan

(claras, cortas de mejora, de entresaca, etc.). Ello no implica que no se realicen, sino que se han obviado en el modelo para evitar un exceso de complicación en el mismo. Por ello, se ha tomado como posibilidad indicada la referida únicamente a estas cortas de regeneración. Dicha posibilidad alcanza en la novena revisión los 135.183 m³, de los que 101.955 corresponden a cortas de reproducción, valor que se ha introducido como posibilidad en la Figura 1. Si se compara la posibilidad de la última revisión con los resultados obtenidos cuando se aplica la restricción de igualdad de volumen en cada período (excluyendo el objetivo de cash-flow), se obtiene un valor superior a la posibilidad indicada en la novena revisión (aproximadamente un 25 % más), independientemente de la función objetivo que se elija. Cuando se introducen a la vez las tres restricciones empleadas en el análisis, se aprecia que el citado flujo de volumen muestra un valor ya más cercano a la posibilidad de la 9ª revisión (un 8 % superior).

Para intentar establecer una equiparación más convincente entre los resultados obtenidos a través de este modelo, y los existentes en la novena revisión del proyecto de ordenación, se ha procedido a calcular, de forma estimativa, el VAN que se obtendría en el monte de acuerdo con los datos existentes en la citada revisión. Hay que tener presente que estos cálculos pueden calificarse únicamente de aproximados, debido a diferentes circunstancias: no existe una constancia clara del año en que se efectúa cada ingreso y cada gasto; en revisiones anteriores ha ocurrido que las cortas ejecutadas son inferiores a las

propuestas, con lo que se dificulta la predicción acerca del volumen que se cortará en el primer período; para estimar el precio medio que alcanzarán los citados productos, se ha efectuado la suposición de que dicho precio medio es igual al que se ha utilizado en las cortas correspondientes a los Tramos V de cada sección y, por último, se han tomado como invariables los gastos e ingresos no provenientes de la madera, que aparecen en la última revisión.

Con todo ello, se ha obtenido un VAN total de $4.368 \cdot 10^6$ pta, que si se compara con el VAN obtenido en las diversas alternativas, se observa que es menor que el resultante de aplicar a la vez las tres restricciones (el VAN oscila alrededor de $5.100 \cdot 10^6$ pta), mientras que si se relajan alguna (o todas) las condiciones, el VAN es notablemente superior.

Análisis de Sensibilidad

Con el fin de conocer cómo se modificarían los resultados expuestos como consecuencia de variaciones de algunos de los parámetros aquí considerados, se ha estimado oportuno establecer un análisis de sensibilidad sobre aspectos que se han tomado como invariables a lo largo del trabajo efectuado. Aunque se pueden tomar en consideración diversos aspectos (e.g. posibilidad de subvenciones, reserva de superficies con fines protectores o recreativos, etc.), el estudio se ha centrado fundamentalmente en parámetros de naturaleza económica, como son la tasa de descuento y los precios. A continuación se van a presentar los resultados de este análisis.

Tasa de Descuento

En el modelo que se ha elaborado, se ha tomado una tasa de descuento igual al 2 %. Al modificarse este valor, se producirán alteraciones en los objetivos considerados según las distintas alternativas. Atendiendo al VAN, se comprueba (Tabla 8) en primer lugar cómo se produce un descenso moderado del mismo conforme se aumenta la tasa de descuento. Este descenso es más pronunciado cuando se consideran al mismo tiempo las tres restricciones. Si ahora consideramos el volumen total por un lado, y el volumen de chapa por otro, vemos que en ambos se produce un ligero descenso en el valor de la función objetivo si tenemos en cuenta la evolución del caso base cuando se incrementa la tasa de descuento. Cuando se activan las tres condiciones estudiadas se puede comprobar que ambos volúmenes prácticamente se mantienen inalterables. Como conclusión, se puede afirmar que el volumen total presenta un comportamiento fuertemente inelástico frente a subidas de la tasa de descuento, y que esta inelasticidad es ligeramente más reducida en el caso del volumen de chapa.

Variaciones en la tasa de descuento provocan efectos muy notables cuando el objetivo a alcanzar es obtener unos flujos de caja máximos e iguales en todos los períodos. Se puede apreciar que cuando dicha tasa es del 1 %, la diferencia mínima entre los flujos de caja de dos períodos consecutivos es del 5 %, mientras que para una tasa del 5 % es inferior al 70 %. Si se especulara con un hipotético caso en el que no existiera el descuento ($i=0$), se comprobaría que al maximizar este objetivo sujeto a la restricción citada, se obtendría una solución factible consistente en un cash-flow igual a $1.399 \cdot 10^6$ pta por período, lo que equival-

TABLA 8
ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TASA DE DESCUENTO
Discount rate sensitivity analysis

	1 %		2 %		3 %		4 %		5 %	
	Base	"A"	Base	"A"	Base	"A"	Base	"A"	Base	"A"
VAN (10 ⁶ pta)	10.368	7.595	7.785	5.149	6.440	3.739	5.623	2.876	5.047	2.311
Volumen total (m ³)	1.518.861	1.103.851	1.477.713	1.103.848	1.442.749	1.103.850	1.410.559	1.096.271	1.411.462	1.096.276
Volumen chapa (m ³)	227.671	207.603	209.341	206.739	190.236	204.938	174.510	203.177	175.291	202.217
Cash Flow (10 ⁶ pta)	95 %		86 %		77 %		70 %			
Turno medio	106	124	99	123	98	123	96	123	97	123

"A" = alternativa Reg./igual vol./inv. fin.
 El porcentaje que acompaña en la fila del cash flow muestra el grado de cumplimiento de este objetivo

dría a un VAN muy cercano al doble cuando la tasa de descuento es del 2 %. Por último, se puede apreciar como el turno medio disminuye ligeramente cuando se incrementa la tasa de descuento en el caso base, pero permanece invariable si se introducen las restricciones aquí adoptadas.

Precio de la Madera

En los escenarios considerados hasta ahora se ha conjeturado que el crecimiento del precio de la madera era igual al de los factores de producción, con lo que los flujos de caja se mantienen constantes en términos monetarios. Aunque la evolución de los precios reales de la madera de *Pinus sylvestris* a nivel nacional durante los últimos años (1972-1992) muestre que se ha experimentado una depreciación (Díaz-Balteiro, 1995), diversos autores e instituciones pronostican una subida del precio de la madera en términos reales. Sobre la base de estas predicciones, se ha construido un escenario (Tabla 9) en el que se considera un aumento en los precios de la madera de un 1 % anual a lo largo del turno de transformación. Bajo este supuesto, se puede apreciar que cuando el objetivo es maximizar el volumen total o el de chapa, los resultados apenas varían, si exceptuamos el crecimiento que se produce en términos de VAN. Por otro lado, si se maximiza el VAN se obtiene una solución bastante similar que en la alternativa base, a excepción del ligero aumento que se produce tanto en el volumen de chapa y del turno.

El incremento que se produce en los flujos de caja como consecuencia del aumento en los precios conduce a que la introducción de alguna restricción en el modelo provoca un descenso menor en términos de VAN que en el caso en que los precios se mantienen constantes. También provoca que cuando el objetivo sea maximizar un cash-flow idéntico en todos los períodos siga sin obtenerse una solución factible, pero en este caso el cumplimiento está mucho más cercano que en el escenario anterior (la desviación entre períodos sería tan sólo de un 4 %, en vez del 14 % que se producía cuando los precios permanecían constantes).

Volumen

Otro posible análisis se podría realizar tomando como base las posibles variaciones en cuanto a las producciones de madera que se obtengan en el futuro. Sin embargo, como se estima que el monte está bastante cercano a su límite máximo de existencias (Prieto et al., 1991; García, 1996) y con objeto de no complicar más el estudio, se ha estimado oportuno no realizar ningún análisis de sensibilidad referente a posibles variaciones de los volúmenes futuros.

DISCUSION

A lo largo de los apartados anteriores se ha construido un modelo de planificación estratégica del que se han obtenido, en función de unos objetivos y unas restricciones fijadas de antemano, unas alternativas de manejo eficientes. En principio, cada una de estas

TABLA 9
ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PRECIO DE LA MADERA
Lumber price sensitivity analysis

	VAN		VOLUMEN		CHAPA		CASH-FLOW	
	Base	Reg./igual vol./inv. fin.	Base	Reg./igual vol./inv. fin.	Base	Reg./igual vol./inv. fin.	Base	Reg./igual vol./inv. fin.
VAN (10⁶ pta)	7.7785	5.149	7.213	5.104	6.372	5.135	5.597	5.597
Volumen total (m³)	1.477.713	1.103.848	1.563.848	1.103.869	1.465.184	1.096.671	1.283.894	1.283.894
Volumen chapa (m³)	209.341	206.739	234.869	198.208	258.510	208.439	226.789	226.789
Turno medio	99	123	112	123	122	124	125	125
Grado de cumplimiento								
86 %								
AUMENTO DEL PRECIO DE LA MADERA EN UN 1 %								
	Base	Reg./igual vol./inv. fin.	Base	Reg./igual vol./inv. fin.	Base	Reg./igual vol./inv. fin.	Base	Reg./igual vol./inv. fin.
VAN (10⁶ pta)	10.711	7.934	10.367	7.828	9.720	7.907	8.814	8.814
Volumen total (m³)	1.521.779	1.103.851	1.566.434	1.103.869	1.465.869	1.096.671	1.283.485	1.283.485
Volumen chapa (m³)	227.386	207.603	235.350	197.305	258.619	208.439	227.225	227.225
Turno medio	105	123	112	123	124	124	123	123
Grado de cumplimiento								
96 %								

alternativas aquí presentadas pudiera tomarse como la elegida, según se busque maximizar un objetivo concreto u otro. En caso de tomar una decisión, se tendría información de los pros y los contras que conlleva el asumir dicha elección en términos de VAN, volumen total, volumen destinado a chapa o de la situación prevista del monte cuando finalice el turno de transformación. Por otro lado, no hay que olvidar la inmediata posibilidad de la ampliación del número de alternativas considerando disyuntivas en las que se activen las restricciones dos a dos; por ejemplo, maximizar el VAN bajo las condiciones de regulación e igualdad de volumen.

De las alternativas aquí mostradas se deduce, en primer lugar, que el introducir una condición en un contexto maximizador implica que la solución obtenida no cumpla cualquiera de las otras restricciones, circunstancia que no suele darse cuando se aplican los métodos de ordenación clásicos. Por otro lado, en las ordenaciones tradicionales normalmente no se persigue que los flujos de volumen en cada período sean exactamente iguales, sino que sean lo más cercanos a un valor fijado de antemano para cada década (la posibilidad recomendada). En el monte que nos ocupa, dicha posibilidad históricamente ha ido creciendo en cada revisión. Así pues, si el gestor está interesado en obtener una cierta homogeneidad de los volúmenes de corta esperados, dispone de varias alternativas, según el objetivo elegido. Como ya se ha visto (Fig. 1), cuando se toma únicamente la restricción de flujo de volumen, independientemente del objetivo, se obtienen resultados superiores a la posibilidad indicada para la novena revisión en un 25 %, mientras que si se eligen aquellas alternativas que además incluyen otras condiciones, la posibilidad es superior tan sólo en un 8 %.

Si se evalúan los resultados obtenidos con respecto a los distintos objetivos, se puede apreciar que cuando se introducen las tres restricciones, los resultados son extraordinariamente parejos. Esto lleva a concluir que introducir las condiciones que hagan cumplir plena y simultáneamente las restricciones empleadas en este análisis encorseta el problema a unos resultados independientemente del objetivo que se maximice.

Precisamente, si comparamos los turnos medios de las alternativas consideradas se puede apreciar que son casi siempre mayores que el turno seguido en la ordenación del monte (100 años), correspondiendo los turnos más elevados (120-125 años) a aquellas alternativas que incorporan las tres restricciones. Probablemente si se hubiera acertado el abanico permitido para las edades de corta, cuando se introducen simultáneamente todas las condiciones, se hubiera producido una solución no factible.

Un tema importante que apenas se ha tenido en consideración hasta ahora es el de la regeneración de las superficies cortadas. En primer lugar, aunque no se ha precisado en el modelo, hay que tener en cuenta que si no se logra la regeneración natural de cada tramo en el período considerado, habría que acudir a métodos artificiales, introduciendo estos nuevos pagos en la planificación. Parece sensato asumir que si está presente la restricción de igualdad de volumen en cada período, las superficies de regeneración serán muy similares. En el modelo se observa (Tabla 10) una mayor igualdad en las superficies de regeneración cuando se aplican a la vez las tres restricciones, independientemente del objetivo considerado. También se puede apreciar cómo los casos base conducen siempre a distribuciones muy sesgadas, excepto cuando el objetivo es el cash-flow. Si se quisiera acotar a una determinada área la regeneración en cada período, se podría introducir una restricción que limitara dicha superficie a regenerar (Bravo *et al.*, 1996).

TABLA 10
ANALISIS DE LAS SUPERFICIES DE REGENERACION
Regeneration area analysis

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen total										
Base	42,56 %	18,24 %	1,76 %	1,07 %	1,00 %	0,90 %	5,48 %	2,03 %	3,53 %	84,20 %
Reg./igual vol./inv. fin.	11,35 %	8,58 %	9,55 %	10,45 %	9,30 %	10,69 %	8,89 %	9,17 %	10,45 %	11,50 %
VAN										
Base	35,80 %	26,68 %	2,41 %	8,45 %	7,92 %	3,82 %	12,13 %	2,76 %	8,58 %	53,90 %
Igual vol.	10,25 %	11,67 %	11,15 %	12,81 %	11,71 %	9,31 %	11,85 %	13,24 %	15,47 %	14,43 %
Inv. final	35,80 %	21,05 %	8,04 %	14,20 %	5,31 %	9,71 %	3,11 %	2,75 %	19,29 %	11,34 %
Regulación	29,83 %	10,15 %	11,82 %	8,17 %	17,93 %	2,07 %	12,51 %	7,50 %	1,78 %	18,21 %
Reg./igual vol./inv. fin.	11,35 %	8,58 %	9,55 %	10,45 %	9,90 %	10,09 %	8,64 %	10,90 %	9,68 %	10,03 %
CASH-FLOW										
Base	9,06 %	8,95 %	9,98 %	12,38 %	7,89 %	8,31 %	12,30 %	11,72 %	16,23 %	21,16 %
VOLUMEN DE CHAPA										
Base	25,40 %	10,59 %	2,38 %	9,30 %	1,11 %	1,35 %	6,72 %	5,73 %	10,78 %	62,60 %
Reg./igual vol./inv. fin.	10,59 %	9,04 %	9,59 %	10,40 %	10,40 %	9,59 %	10,01 %	10,00 %	9,35 %	8,69 %

En esta tabla se muestra el porcentaje de superficie de regeneración en cada período según el objetivo y las restricciones consideradas.

A tenor de los resultados obtenidos se observa que la diferencia entre considerar un flujo idéntico en dinero convenientemente actualizado o en madera radica en que, según el análisis efectuado, para que ambas produjeran el mismo resultado, el precio de la madera debería crecer anualmente a un ritmo igual que la tasa de descuento². El problema que presenta el objetivo de igualdad de flujos de caja es que al considerar un horizonte de planificación tan dilatado, la acción del descuento (por muy pequeña que sea la tasa empleada) induce a que, a partir de aproximadamente el quinto período, los ingresos actualizados correspondientes a cortas futuras disminuyen considerablemente. No hay que olvidar que el asumir esta condición implica el realizar unas cortas que tienen una tendencia creciente a lo largo de los períodos, lo que implica el efectuar una gestión bastante conservadora, al menos en las primeras décadas.

Observando los volúmenes de corta obtenidos para cada período, ya se ha visto que bajo la restricción de igualdad de volúmenes son siempre superiores a la posibilidad indicada en la ordenación. Esto no implica una debilidad del modelo, ya que probablemente cuando se diseñe la planificación táctica, o a corto plazo, estos volúmenes se verán reducidos. Por último, no hay que olvidar que a lo largo de esta planificación tan sólo se ha considerado objetivos derivados de la producción de madera. Sin embargo, existen otras producciones y/o servicios que presta el monte que podrían introducirse en el modelo bien como objetivos, o bien como restricciones. Esto, sin duda, constituiría una línea de investigación a seguir en el futuro, utilizando herramientas analíticas como las derivadas de la teoría de la decisión multicriterio. Otras posibles mejoras en el modelo vendrían dadas por la introducción de claras y otros tipos de corta, por la introducción de restricciones de contigüidad y por el establecimiento de una contabilidad más precisa de los cobros y pagos dentro de cada período.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha puesto de manifiesto, en primer lugar, que la aplicación de técnicas basadas en la programación lineal al problema de la ordenación de montes resulta perfectamente factible. En concreto, se ha construido un modelo de planificación estratégica para el monte de Navafría que proporciona alternativas de manejo muy diversas, pero perfectamente asumibles por cualquier persona encargada de su gestión, a excepción del caso en que se intentara obtener una solución en la que se produjeran unos flujos de caja máximos e iguales en cada período. La información que proporciona el estudio realizado va más allá de la simple elección de una determinada solución, ya que permite fácilmente conocer cuál es el coste de introducir cualquier tipo de restricción. Dicho coste viene dado en términos monetarios, y/o en volúmenes totales o de madera cuyo destino final sea la chapa.

Analizando las alternativas señaladas, se puede comprobar que una gran parte de las mismas suelen dar como resultado unos turnos medios superiores al que se sigue en la realidad. Además, si se persigue un flujo de volúmenes homogéneo en cada período, se consigue siempre con unos niveles superiores a la posibilidad indicada en el proyecto de orde-

² Es por ello que cuando se considera una tasa de descuento del 1 % se obtiene el mismo grado de cumplimiento que si se contempla la hipótesis de una tasa del 2 %, pero considerando un aumento en los precios del 1 % anual.

nación. También se puede comprobar que el introducir todas las restricciones consideradas provoca, en primer lugar, un descenso en el objetivo considerado que se puede cifrar, como mucho, en una tercera parte. En este caso se obtiene una solución prácticamente idéntica, independientemente del objetivo que se considere.

Si se realiza un análisis de sensibilidad con respecto a la tasa de descuento y al precio de la madera, se puede apreciar que mientras los objetivos de índole económico-financiera (VAN, cash-flow) varían considerablemente, los otros objetivos presentan un comportamiento bastante inelástico a variaciones de estos parámetros. También conviene resaltar que si se tiene la idea de adoptar como objetivo principal el maximizar el volumen con destino a chapa, nunca se va a obtener un mayor rendimiento económico o un mayor volumen total que si se maximizara el VAN o el volumen. Para justificar alternativas en las que se maximice este objetivo se debe acudir a otro tipo de razones (estructurales del mercado, a indicios de una subida en los precios de este producto, etc.).

Cabe resaltar el hecho de que algunas de las alternativas aquí presentadas pueden ser perfectamente asumibles para la gestión del monte de Navarra, ya que aparte de cumplir las restricciones fijadas (excepto cuando el objetivo es maximizar el cash-flow) ofrecen en sus soluciones características selvícolas usualmente demandadas por los gestores, como son, para algunas de sus alternativas, superficies de regeneración en cada período muy similares y turnos medios iguales o mayores que los utilizados en el proyecto de ordenación. Además, este posible alargamiento de las edades de corta puede traer consigo beneficios en otro tipo de producciones y/o servicios que pueda prestar el monte, pero ahí ya se entraría en una posible extensión natural a este trabajo, la planificación forestal con objetivos múltiples.

Naturalmente, todo lo que hasta aquí se ha afirmado no implica que estos métodos no presenten críticas (ya se ha señalado alguna referencia) ni que puedan necesitar un mayor número de estudios con el fin de mejorar sus prestaciones. Las posibles extensiones a este trabajo reseñadas en el apartado anterior podrían perfeccionar los resultados aquí obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a los Profesores D. Carlos Romero y D. Casimiro Herruzo la lectura crítica que han hecho de este manuscrito, así como los comentarios y sugerencias de los revisores anónimos. El trabajo de Luis Díaz Balteiro está financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) y por la Consejería de Educación y Cultura de la Comunidad de Madrid. No obstante, los posibles errores que se encuentren en este trabajo se hallan bajo la única responsabilidad de los autores.

SUMMARY

Forest management models based on linear programming. An application to Navarra forest (Segovia, Spain)

This paper illustrates how analytical methods like linear programming can be fruitfully applied to forest management problems. This kind of approach is rather ignored in Spain. In fact, since last century Spanish forests have been managed with the help of German methods, which are not supported by any optimisation model. A

linear programming model is built and applied to the Spanish forest Navarra. This forest has been chosen for our exercise because it has been deeply studied with the help of classic methods, so that different methodologies can be compared.

Four objectives functions have been defined. Two are typically linked to silvicultural goals: maximise the total timber volume and veneer volume, and the other two show economic targets: maximise the net present value and maximise a similar cash flow in each period. Several constraints have been introduced. In all cases except one a feasible solution was found. Besides, a sensitivity analysis has been incorporated in order to check the influence of variations of the discount rate and expected wood price.

The management alternatives proposed in this paper show harvest flows longer than the harvest flow indicated in the management project. In short, the results generated in our application by classic (German) methods can be considered a particular case of the results provided by the optimisation models based upon linear programming.

KEYWORDS: Forest management
Linear programming
Forest economics.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BARE B.B., BRIGGS D. G., ROISE J.P., SCHREUDER G.F., 1984. A survey of systems analysis models in forestry and the forest products industries. *European Journal of Operational Research*, 18 (1), 1-18.
- BERNETTI L., 1994. L'impiego dei modelli di analisi multicriteriale nella pianificazione forestale. *Comunicazioni di Ricerca dell'Istituto Sperimentale per l'Assessmentamento Forestale e per l'Apicoltura*, 94 (3), 63-115.
- BRACK C.L., MARSHALL P.L., 1992. Solving a "puzzling" problem: Knowledge-based approaches to forest operations scheduling. *AI Applications*, 6(4), 39-47.
- BRAVO F., RAMOS M.T., RAMIREZ A., SAEZ J., 1996. Comparación del método del tramo móvil en regeneración con técnicas de programación lineal. *Cuadernos S.E.C.F.*, 1, 179-184.
- DAVIS L.S., JONHSON K.N., 1986. *Forest Management*. McGraw-Hill, New York, 790 pp.
- DIAZ BALTEIRO L., 1995. *Modelos de Programación Matemática para la Ordenación de Montes: Desarrollos Teóricos y Aplicaciones al Sector Forestal Español*. Tesis Doctoral E.T.S.I. Montes, UPM Madrid, 193 pp.
- DIAZ-BALTEIRO L., ROMERO C., 1998a. Modeling timber harvest scheduling problems with multiple criteria by multigoal programming: an application in Spain. *Forest Science*, 44 (1), 47-57.
- DIAZ-BALTEIRO L., ROMERO C., 1998b. Timber harvest scheduling problems: compromise programming and utility optimization models. *Lecture Notes in Economics And Mathematical Systems*, 455, 328-337.
- DUBOURDIEU J., PRIETO A., LOPEZ QUERO M., 1993. *Manual de Ordenación de Montes*. Paraninfo, Madrid, 261 pp.
- GARCIA LOPEZ J., 1996. Breve reseña del monte "Pinar de Navarra" y de la evolución de su ordenación. *Cuadernos S.E.C.F.*, 1, 389-398.
- JOHNSON K.N., SCHEURMAN H.L., 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives- Discussion and synthesis. *Forest Science (Monog.)*, 18.
- KULA, E., 1988. *The Economics of Forestry: Modern Theory and Practice*. Croom & Helm, London, 185 pp.
- KOURTIZ P., 1990. Artificial intelligence: a new tool for forest management. *Canadian Journal of Forest Research*, 20 (4), 428-437.
- LEUSCHNER W.A., 1990. *Forest Regulation, Harvest Scheduling and Planning Techniques*. John Wiley & Sons, New York, 281 pp.
- MADRIGAL A., 1994. *Ordenación de montes arbolados*. Colección Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, 375 pp.
- MENDOZA G.A., SPROUSE W., 1989. Forest planning decision making under fuzzy environments: an overview and Illustration. *Forest Science*, 35, 481-502.
- MONTERO G., ROJO A., ALIA R., 1992. Determinación del turno de *Pinus sylvestris* en el Sistema Central. *Montes*, 29, 42-48.
- PRIETO A., FERRANDO J., SAEZ A., BERNARDI P., 1991. 9ª Revisión del Proyecto de Ordenación y Plan Especial Monte nº 198 "Pinar de Navarra". ETSI Montes, Madrid.
- RAMOS M.T., BRAVO F., RAMIREZ A., SAEZ J., 1996. Programación lineal aplicada a la ordenación forestal: Análisis del sacrificio de cortabilidad. *Montes*, 46, 5-11.
- ROJO A., MONTERO G., 1996. *El Pino Silvestre en la Sierra de Guadarrama*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, 293 pp.

- ROMERO C., 1989. Modelos de planificación forestal: Una aproximación desde el análisis multicriterio. *Revista de Estudios Agro-Sociales*, 147, 71-92.
- STIRN L.Z., 1990. Adaptive dynamic model for optimal forest management. *Forest Ecology and Management*, 31 (3), 167-188.
- TARP P., HELLES F., 1995. Multi-Criteria decision making in forest management planning.- An overview. *Journal of Forest Economics*, 1 (3), 273-306.
- WEINTRAUB A., BARE, B., 1996. New issues in forest land management from an operations research perspective. *Interfaces*, 26 (5), 9-25.
- WILLIAMS B.K., 1989. Review of dynamic optimization methods in natural resource management. *Natural Resource Modelling*, 3 (2), 137-217.

ANEXO I

La función objetivo y las restricciones endógenas tendrían la forma siguiente:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^N C_{ijkl} \cdot X_{ijkl} \quad [1]$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N X_{ijkl} = B_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad [2]$$

En donde:

C_{ijkl} = coeficiente de la función objetivo: bien sea el valor actual neto, el volumen, el volumen de chapa o el cash-flow en un período. Los subíndices expresan: la sección del monte ($i = 1, 2, 3$), el cuartel del monte ($j = A, B, C$), el tramo $k = I, II, III, IV, V$) y la prescripción correspondiente ($l = 1, \dots, N$), en donde N sería el número de posibles prescripciones sobre el turno de transformación para cada tramo. Así, por ejemplo, C_{IAIII5} representaría el VAN por hectárea de la prescripción cinco correspondiente al tramo II, del cuartel A de la sección primera. De igual forma, X_{ijkl} sería la superficie (ha) del tramo k del cuartel j de la sección i , sometido a la prescripción l . B_{ijk} sería la superficie del tramo k , del cuartel j de la sección i en el momento inicial.

Las restricciones exógenas serían:

FLUJO DE VOLUMEN:

$$H_x = H_{x+1} \quad x = 1, \dots, 9 \quad [3]$$

INVENTARIO FINAL:

$$\begin{aligned} F_1 &\geq 190117,1 \\ F_2 &\geq 192339,8 \\ F_3 &\geq 132719,6 \end{aligned} \quad [4]$$

REGULACION:

$$A_y = 500,8 \quad y = 1, \dots, 5 \quad [5]$$

IGUALDAD DE CASH-FLOW:

$$CF_x = CF_{x+1} \quad x = 1, \dots, 9 \quad [6]$$