MODELOS DE PLANIFICACION FORESTAL: UNA APROXIMACION DESDE EL ANALISIS MULTICRITERIO

Por
CARLOS ROMERO (*)

I. INTRODUCCION

Los bosques pertenecen al grupo de recursos naturales denominados destructibles-renovables. En efecto, la utilización de una unidad de recursos forestales implica su agotamiento *(carácter destructible),* pero además implica la creación de nuevos *stocks* forestales por un proceso de auto-regeneración regido por leyes de tipo biológico *(carácter renovable).* Para definir la política óptima de asignación intertemporal de un recurso con tales características es necesario establecer el nivel de consumo del recurso compatible con un *stock* residual que permita la regeneración de la masa forestal. La no observación de tal condición puede producir —como de hecho está produciendo en muchos bosques de nuestro país— colapsos forestales con peligrosas implicaciones fu-

(*) Departamento de Economía Agraria, Administración de Empresas y Estadística (E.T.S. de Ingenieros Agrónomos) de la Universidad de Córdoba. Deseo agradecer a la doctora M.ª Inés Mínguez tanto el haberme sabido transmitir su preocupación intelectual por la explotación racional de los recursos naturales como los comentarios a este artículo. Este trabajo forma parte del proyecto PA-0068 financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT).

— Revista de Estudios Agro-Sociales. Núm. 147 (enero-marzo 1989).

turas tanto desde un punto de vista económico (desabastecimientos en los mercados de madera) como ecológico (desequilibrios medioambientales).

Por otro parte, los bosques se van considerando hoy en día como sistemas biológicos con propósitos múltiples. Es decir, los bosques no sólo sirven para producir madera, sino que pueden y deben cumplir otros objetivos entre los que se pueden citar los siguientes: protección de la fauna, incremento de las oportunidades recreativas, preservación de la belleza natural, control de la erosión del suelo, etc.

Enfocados los bosques como sistemas de uso múltiple una adecuada planificación de los mismos hace necesario el uso de modelos decisionales con criterios múltiples. En efecto, el enfoque tradicional que acepta implícitamente que la función de utilidad de los centros decisores posee como único argumento el beneficio se revela como totalmente insuficiente como base para planificar modernamente el uso de un bosque.

El propósito de este trabajo de corte claramente divulgatorio es el de mostrar las posibilidades de la moderna teoría de la decisión multicriterio en el campo de la planificación forestal. Con tal fin el artículo se organiza de la siguiente manera. Después de esta breve introducción se plantea un ejemplo de un problema tradicional de planificación forestal que se resuelve con la ayuda del instrumental usual: programación lineal con un solo criterio. En los dos apartados siguientes se reformula este problema dentro de un enfoque multicriterio, abordándose su resolución por medio de técnicas multiobjetivo como la programación compromiso. Finalmente, en el último apartado se realiza una extensa revisión bibliográfica de trabajos de planificación forestal realizados desde una óptica decisional multicriterio.

II. BOSQUES REGULADOS CON EDAD UNIFORME: UN MODELO MONOCRITERIO

Supongamos el caso de un bosque de pinos de 16.000 hectáreas de superficie dividido en tres zonas con la distribución por grupos de edad representada en el siguiente cuadro.

Cuadro n.º 1

SITUACION INICIAL DEL BOSQUE

Zona	Superficie (ha.)	Grupo de edad (años)
1	4.000	1-10
2	11.000	11-20
3	1.000	21-30

Los rendimientos madereros por grupos de edad vienen dados en el siguiente cuadro.

Cuadro n.º 2

RENDIMIENTOS FISICOS POR EDADES

Grupo de edad	Producción (m^3/ha.)
0-10	25
11-20	100
21-30	200
31-40	325
41-50	375

El propietario del bosque, que para fijar ideas suponemos se trata de un centro decisor público, desea regularlo en un período de conversión de 30 años, fijándose la rotación óptima (período de tiempo entre talas) en 40 años. Es decir, se pretende conseguir en 30 años un bosque cuyas masas forestales estén distribuidas en cuatro grupos de edad (1-10 años, 11-20 años, 21-30 años y 31-40 años respectivamente) con una superficie de 4.000 hectáreas por grupo. De esta forma, cada diez años se talará la cuarta parte del bosque (es decir, 4.000 hectáreas) (1). Conviene indicar que estamos hablando de décadas en vez de periodos de tiempo más pequeños para reducir el número de variables de decisión y mantener la dimensión del modelo dentro de unos límites razonables que resulten compatibles con un mínimo de claridad expositiva.

(1) Este tipo de problema fue formulado inicialmente por Nautiyal & Pearse (1967). Un tratamiento similar al que efectuamos en nuestro artículo aunque desde una óptica estrictamente monocriterio puede verse en el texto de Buonngiorno & Gilles (1987, cap. 6).

La rotación óptima del bosque se establece con arreglo al llamado teorema de Faustman-Pressler-Ohlin que dice: «el momento económicamente óptimo para talar una masa forestal es aquel en el que la tasa de cambio con respecto al tiempo del valor de mercado de la masa forestal iguala al tipo de interés multiplicado por el valor de mercado del suelo y del vuelo» (véase por ejemplo, P-O Johansson & K-G Löfgren, 1986 p. 80 y E. Kula, 1988 pp. 135-157). Aplicando este teorema a los datos del Cuadro 2 y para unos determinados valores de la madera, del suelo y del tipo de interés se obtiene la rotación o período óptimo de corte de 40 años.

Con objetivo de modelizar el proceso de conversión del bosque desde la situación inicial a la situación final regulada creamos las variables de decisión x_{ij}. Estas variables representan la superficie a talar durante el período i-ésimo en el grupo de edad j-ésimo. Así por ejemplo $x_{2,3}$ representa la superficie a talar durante la segunda década en el grupo de edad tercero, esto es, comprendido entre 21 y 30 años. Utilizando estas variables, así como las condiciones iniciales del bosque dadas por el Cuadro 1 es posible determinar la evolución dinámica de las masas forestales a lo largo del período de conversión.

El Cuadro 3 presenta una forma sistemática de establecer los cambios dinámicos en las diferentes masas forestales. La última fila de dicho Cuadro reviste una especial importancia pues representa las superficies por grupos de edad al acabar el período de conversión (el llamado *estado terminal del bosque).* Obviamente las masas forestales en la cuarta década, correspondientes a los primeros cuatro grupos de edad deberán ser iguales a 4.000 hectáreas mientras que las correspondientes a los dos últimos grupos de edad deberán tener una superficie nula.

En este tipo de problemas se suele suponer que el objetivo perseguido por el centro decisor consiste en maximizar la producción de madera durante el período de conversión. Para alcanzar tal propósito, utilizando los datos del Cuadro 2 y los estados terminales del bosque definido en la última fila del Cuadro 3, se formula el siguiente programa lineal cuya resolución permite obtener el plan óptimo de regulación del bosque:

Cuadro n.º 3

EVOLUCION DE LAS MASAS FORESTALES Y DE LAS SUPERFICIES TALADAS EN UN PROCESO DE REGULACION DE UN BOSQUE (PERIODO DE CONVERSION TRES DECADAS)

GRUPO DE EDAD / DECADA	1	2	3	4	5	6
1. Masa forestal Superficie talada	4.000 x_{11}	11.000 x_{12}	1.000 x_{13}			
2. Masa forestal Superficie talada	$x_{11}+x_{12}+x_{13}$ x_{21}	$4.000—x_{11}$ x_{22}	$11.000—x_{12}$ x_{23}	$1.000—x_{13}$		
3. Masa forestal Superficie talada	$x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}$ x_{31}	$x_{11}+x_{12}+x_{13}—x_{21}$ x_{32}	$4.000—x_{11}—x_{12}$ x_{33}	$11.000—x_{12}—x_{23}$ x_{34}	$1.000—x_{13}—x_{24}$ x_{35}	
4. Masa forestal	$x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}$ $+x_{35}$	$x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}$ $—x_{31}$	$x_{11}+x_{12}+x_{13}—x_{21}$ $—x_{32}$	$4.000—x_{11}—x_{22}$ $—x_{33}$	$1.100—x_{12}—x_{23}$ $—x_{34}$	$1.000—x_{13}—x_{24}$ $—x_{35}$

Función objetivo:

$$\text{Max } Z_1 = 25x_{11} + 25x_{21} + 25x_{31} + 100x_{12} + 100x_{22} + 100x_{32} + 200x_{13} + 200x_{23} + 200x_{33} + 325x_{24} + 325x_{34} + 375x_{35}$$

Sujeto a:

$$\begin{array}{ll} x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} & = 4.000 \\ x_{21} - x_{31} + x_{22} + x_{23} + x_{24} & = 4.000 \\ x_{11} - x_{21} + x_{12} - x_{32} + x_{13} & = 4.000 \\ x_{11} + x_{22} + x_{33} & = 0 \\ x_{12} + x_{23} + x_{34} & = 11.000 \\ x_{13} + x_{24} + x_{25} & = 1.000 \\ \underline{x} \geq \underline{O} & \end{array} \qquad (1)$$

La resolución del programa lineal (1) conduce a la siguiente solución:

$$x_{12} = 4.000 \quad x_{23} = 3.000 \quad x_{24} = 1.000 \quad x_{34} = 4.000$$
$$x_{11} = x_{13} = x_{21} = x_{22} = x_{31} = x_{32} = x_{33} = 0$$

El plan de manejo del bosque correspondiente a esta solución viene representado en el Cuadro IV. De la observación de este cuadro se deduce:

a) El bosque queda regulado transcurridas dos décadas.

b) La producción total de madera durante el período real de conversión (esto es, dos décadas) es de 1.325.000 m^3.

c) La producción de madera durante el período de planificación es muy poco uniforme.

Cuadro n.º 4

PLAN DE REGULACION DEL BOSQUE (POLITICA DE MAXIMIZACION DE LA PRODUCCION DE MADERA)

DECADA / GRUPO DE EDAD	1	2	3	4	5	6	PRODUCCION DE MADERA (m^3)
1. Masa forestal	4.000	11.000	1.000				400.000
Superficie talada		4.000					
2. Masa forestal	4.000	4.000	7.000	1.000			925.000
Superficie talada			3.000	1.000			
3. Masa forestal	4.000	4.000	4.000	4.000	0		1.300.000
Superficie talada				4.000			
4. Masa forestal	4.000	4.000	4.000	4.000	0	0	1.300.000

III. BOSQUES REGULADOS CON EDAD UNIFORME: ENFOQUE MULTICRITERIO

Tal como habíamos indicado en el apartado introductorio, los objetivos con arreglo a los cuales se explota un bosque son múltiples, siendo la maximización del volumen de la madera cortada un objetivo importante, pero no necesariamente el único a considerar. Para ilustrar cómo los métodos multicriterio constituyen un instrumento analítico adecuado para planificar el uso de un bosque desde diferentes perspectivas vamos a introducir en el ejemplo del apartado anterior dos objetivos adicionales. El primero de ellos representa la maximización del valor actual de la madera cortada y el segundo la maximización de la uniformidad en los rendimientos de madera en las tres décadas que comprende el período de planificación.

La expresión matemática del primer objetivo adicional para un tipo de descuento del 8%[2] y un precio de la madera de P ptas/m^3 será igual a:

$$\frac{25P}{(1+0{,}08)^5}x_{11} + \frac{25P}{(1+0{,}08)^{15}}x_{21} + \dots + \frac{375P}{(1+0{,}08)^{25}}x_{35} \quad (2)$$

Efectuando operaciones y eliminando el precio P por afectar a todos los términos, la maximización de (2) es equivalente a la maximización de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\text{Max } Z_2 = {} & 17{,}01x_{11} + 7{,}88x_{21} + 3{,}65x_{31} + 68{,}06x_{12} + 31{,}52x_{22} \\ & + 14{,}60x_{32} + 136{,}1x_{13} + 63{,}04x_{23} + 29{,}2x_{33} + 102{,}44x_{24} \quad (3) \\ & + 47{,}45x_{34} + 57{,}75\, x_{35}\end{aligned}$$

Por otra parte, maximizar la uniformidad en los niveles productivos de madera es equivalente a minimizar las desviaciones (positivas y negativas) existentes entre dos décadas consecutivas (esto es, entre la primera y la segunda y entre la segunda y la ter-

(2) Un tipo de descuento del 8% puede venir dado por un tipo de interés del 12% y unas expectativas de crecimiento monetario de los precios de la madera del 4%.

cera década, respectivamente). Tal conceptualización conduce a la siguiente formulación matemática para este segundo objetivo:

$$\text{Min } Z_3 = n_1 + p_1 + n_2 + p_2$$

sujeto a:

$$25x_{11} - 25\,x_{21} + 100x_{12} - 100x_{22} + 200x_{13} - 200x_{23} - 325x_{24} + n_1 - p_1 = 0$$

$$25x_{21} - 25x_{31} + 100x_{22} - 100x_{32} + 200x_{23} - 200x_{33} + 325x_{24} - 325x_{34} - 375x_{35} + n_2 - p_2 = 0 \quad (4)$$

donde n_1 y n_2 representan las variables de desviación negativas, mientras que p_1 y p_2 representan las variables de desviación positivas.

Una manera de obtener una información inicial sumamente útil de un problema multiobjetivo como el que estamos analizando consiste en optimizar cada uno de los objetivos por separado, computando el valor que alcanzan los demás objetivos en cada una de las soluciones óptimas. De esta forma se obtiene una matriz cuadrada, denominada matriz de pagos, cuya dimensión viene dada por el número de objetivos considerados. En el Cuadro 5 está representada la matriz de pagos para nuestro problema. La interpretación de dicha matriz es inmediata. Así, los elementos de la primera fila de la matriz indican que la máxima producción de madera (2.625.000 m^3) es compatible con un valor actual de 753.600P ptas. y con una desviación con respecto a una producción perfectamente uniforme de 900.000 m^3. Los elementos de las otras dos filas se interpretan de una manera análoga.

Cuadro n.º 5

MATRIZ DE PAGOS PARA LOS TRES OBJETIVOS

	Producción de madera m^3	Valor actual de la madera m^3	Uniformidad de la producción m^3
Producción de madera	2.625.000	753.600	900.000
Valor actual de la madera ...	1.800.000	974.680	1.500.000
Uniformidad de la producción	2.284.252	869.366	0

La matriz de pagos permite investigar con facilidad el grado de conflicto existente entre los objetivos que estamos considerando. Así, en nuestro ejercicio existe un claro conflicto entre el objetivo valor actual de la madera y los objetivos producción de madera y uniformidad de la producción. En efecto, la maximización del valor actual de la madera es sólo compatible con una cifra de producción de madera inferior en más de un 30% a la producción máxima y con una desviación de 1.500.000 m^3 con respecto a la uniformidad óptima.

Los elementos de la diagonal principal de la matriz de pagos constituyen el llamado «punto ideal»; esto es, la solución en la que todos los objetivos alcanzan su valor óptimo. Los elementos peores de cada columna representan el llamado punto anti-ideal. Así, para nuestro caso dicho punto viene dado por el vector: [1.800.000, 753.600, 1.500.000]. El vector anti-ideal juega un papel esencial para normalizar objetivos como veremos en el apartado siguiente.

Si el punto ideal fuera alcanzable resulta obvio que dicho punto representaría la solución óptima. Ahora bien, cuando los objetivos se encuentran en conflicto entre sí, como sucede en nuestro ejemplo, el punto ideal es inalcazable. En tales casos —que son los usuales en la práctica— el vector ideal se utiliza como un punto de referencia para obtener políticas compromiso, como se desarrollará en el apartado siguiente.

Cuando el punto ideal es inalcazable el problema multiobjetivo consiste en optimizar simultáneamente un conjunto de objetivos sujetos al cumplimiento de las restricciones inherentes al problema analizado. Como este tipo de problemas no es resoluble —excepto, insistimos, cuando el ideal es alcanzable— la programación multiobjetivo limita su propósito a la determinación de políticas eficientes en un sentido paretiano.

Una política se dice que es paretianamente eficiente cuando siendo posible (esto es, cumpliendo las restricciones) no existe otra solución asímismo posible que proporcine una mejora en uno de los objetivos sin producir un empeoramiento en al menos otro de los objetivos.

Una descripción detallada de las diferentes técnicas que existen para generar el conjunto de políticas paretianas eficientes en un problema multiobjetivo puede verse entre otros en (Romero & Rehman, capítulo 4, 1989). En nuestro ejemplo se recurre a un software especializado (Computing & Systems Consultants, 1987) para determinar el conjunto eficiente de nuestro problema. Así, en el Cuadro 6 se recogen los planes forestales eficientes tanto en el espacio de los objetivos como en el espacio de las variables de decisión para los tres objetivos considerados.

¿Cuál de los 10 planes forestales eficientes del Cuadro 6 elegirá el centro decisor? Obviamente la respuesta a esta pregunta dependerá de la estructura de las preferencias del centro decisor; es decir, del valor relativo que el centro decisor asocie a cada uno de los tres objetivos considerados. De entre los enfoques generales existentes para elegir de entre los elementos del conjunto eficiente la solución óptima vamos a recurrir a la llamada «programación compromiso». Así, en el apartado siguiente, recurriendo a este enfoque multiobjetivo se establecerá una política forestal compromiso entre las políticas eficientes establecidas en este apartado.

IV. COMPROMISOS FORESTALES EFICIENTES

La aplicación de la programación multiobjetivo a los datos de nuestro problema nos ha permitido generar un conjunto de planes forestales eficientes. Para elegir una solución óptima de entre el conjunto de soluciones eficientes Zeleny (1973, 1974) propuso un método al que denominó programación compromiso. La idea básica de este método consiste en definir como «mejor solución» o «mejor compromiso» aquella solución eficiente que se encuentre más próxima al punto ideal en el sentido que este punto fue definido en el apartado anterior.

La estructura operativa de la programación compromiso puede resumirse de la siguiente manera. En primer lugar, se establece el grado de proximidad d_j entre el objetivo j-ésimo y su ideal por medio de la expresión:

$$d_j = Z_j^* - Z_j(\underline{x})$$

Cuadro n.° 6

PLANES FORESTALES EFICIENTES
(PRODUCCION DE MADERA —VALOR ACTUAL DE LA MADERA— UNIFORMIDAD DE PRODUCCION)

Puntos extremos	Funciones objetivo			Variables de decisión											
	Z_1 (producción de madera) m^3	Z_2 (valor actual de la madera) m^3	Z_3 (uniformidad de la producción) m^3	x_{11} -ha-	x_{12} -ha-	x_{13} -ha-	x_{21} -ha-	x_{22} -ha-	x_{23} -ha-	x_{24} -ha-	x_{31} -ha-	x_{32} -ha-	x_{33} -ha-	x_{34} -ha-	x_{35} -ha-
$L_1 \rightarrow$ 1	2.284.452	869.366	0	—	5614	1000	220	—	3780	—	—	2394	—	1606	—
2	2.322.223	860.484	77.778	—	5222	1000	—	—	4000	—	—	2222	—	1778	—
3	2.500.000	801.480	500.000	—	3000	1000	—	—	5000	—	1000	—	—	3000	—
4	2.600.000	782.240	800.000	—	3000	1000	—	—	4000	—	—	—	—	4000	—
5	2.625.000	753.600	900.000	—	4000	—	—	—	3000	1000	—	—	—	4000	—
6	2.225.000	887.870	175.000	—	6000	1000	—	—	4000	—	—	3000	—	1000	—
7	2.100.000	923.080	500.000	—	7000	1000	—	—	4000	—	—	4000	—	—	—
8	1.928.572	952.565	728.571	—	9286	1000	2286	—	1714	—	4000	—	—	—	—
9	1.650.000	965.470	1.125.000	—	11000	1000	7000	—	—	—	3000	1000	—	—	—
10	1.800.000	974.680	1.500.000	—	11000	1000	4000	—	—	—	—	4000	—	—	—
$L\infty$	2.260.123	876.901	71.266	—	5.771	1.000	131	—	3.869	—	—	2.641	—	1.359	—

cuando el objetivo es maximizado, o por medio de la expresión:

$$d_j = Z_j(\underline{x}) - Z_j^*$$

cuando el objetivo es minimizado, donde Z_j^* es el valor ideal del objetivo j-ésimo. Cuando las unidades en que vienen medidos los objetivos son distintas y/o los valores absolutos de los mismos son asímismo sensiblemente diferentes, como sucede en nuestro ejemplo, es indispensable trabajar con desviaciones absolutas en vez de con desviaciones relativas (Romero, 1985). Así, el grado de proximidad d_j viene dado por:

$$d_j = \frac{|Z_j^* - Z_j(\underline{x})|}{|Z_j^* - Z_{*j}|}$$

donde Z_{*j} es el anti-ideal para el objetivo j-ésimo en el sentido definido en el apartado anterior.

Con el propósito de medir la distancia existente entre cada solución eficiente y el punto ideal, se introduce la siguiente familia de funciones de distancia:

$$L_p(w) = \left[\sum_{j=1}^{n} (w_j\, d_j)^p \right]^{1/p}$$

donde los coeficientes w_j representan los pesos relativos que el centro decisor asigna a la discrepancia existente entre el objetivo j-ésimo y su valor ideal.

Para la métrica L_1 ($p = 1$) el «mejor compromiso» o solución más próxima al punto ideal se obtiene resolviendo el siguiente programa lineal (e.g. Romero & Rehman, 1989 págs. 93-94):

$$\begin{aligned} \text{Min } L_1 &= \sum_{j=1}^{n} w_j\, d_j \\ \text{s.a. } & \underline{x} \in \underline{F} \end{aligned} \qquad (5)$$

donde $\underline{F}$ es el subconjunto alcanzable.

Particularizando el modelo (5) a los datos de nuestro problema se obtiene la siguiente formulación:

$$\text{Min } L_1 = \frac{w_1\,[2.625.000 - Z_1(\underline{x})]}{2.625.000 - 1.800.000} + \frac{w_2\,[974.680 - Z_2(\underline{x})]}{974.680 - 753.600} + \frac{w_3\,[Z_3(\underline{n}, \underline{p}) - 0]}{1.500.000 - 0}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}
&Z_1 = 25x_{11} + 25x_{21} + \dots + 375x_{35}\\
&Z_2 = 17{,}01x_{11} + 7{,}88x_{21} + \dots + 57{,}75x_{35}\\
&Z_3 = n_1 + p_1 + n_2 + p_2\\
&25x_{11} - 25x_{21} + .. - 325x_{24} + n_1 - p_1 = 0\\
&25x_{21} - 25x_{31} + \dots - 375x_{35} + n_2 - p_2 = 0
\end{aligned} \tag{6}$$

$\underline{x} \in F'$ [conjunto de restricciones definido por el modelo (1)]

La resolución del programa lineal (6) para $w_1 = w_2 = w_3$ (esto es, cuando los tres objetivos considerados son igualmente importantes) conduce a la solución eficiente 1 del Cuadro 6. En otras palabras, la política 1 representa «el mejor compromiso» o solución eficiente más próxima al ideal cuando se utiliza la métrica L_1.

Para la métrica L_∞ ($p = \infty$) se minimiza la máxima desviacion individual. Esto es, cuando $p = \infty$ sólo se toma en consideración la desviación más grande. Para esta métrica, el «mejor compromiso» se obtiene resolviendo el siguiente programa lineal (e.g. Romero & Rehman, 1989, págs. 94-95):

$$\text{Min } L_\infty = D$$

sujeto a:

$$\begin{aligned}
w_1\, d_1 &\leq D\\
&\vdots\\
w_n\, d_n &\leq D\\
\underline{x} &\in \underline{F}
\end{aligned} \tag{7}$$

Particularizando el modelo (7) a los datos de nuestro problema se obtiene la siguiente formulación:

$$\text{Min } L_\infty = D$$

$$\frac{w_1\,[2.625.000 - Z_1(\underline{x})]}{2.625.000 - 1.800.000} \leq D$$

$$\frac{w_2\,[974.680 - Z_2(\underline{x})]}{974.680 - 753.600} \leq D \qquad (8)$$

$$\frac{w_3\,[Z_3(\underline{n}, \underline{p}) - 0]}{1.500.000 - 0} \leq D$$

$\underline{x} \in F''$ [conjunto de restricciones definido por el modelo (6)]

La solución óptima del programa lineal (8) considerando nuevamente $w_1 = w_2 = w_3$ conduce a la solución eficiente representada en la última fila del Cuadro 6. En otras palabras, dicha política eficiente representa «el mejor compromiso» o solución eficiente más próxima al ideal cuando se utiliza la métrica L_∞.

Para obtener «soluciones compromiso» para métricas comprendidas entre $p > 1$ y $p < \infty$ se hace necesario recurrir a algoritmos de programación matemática no lineal. Sin embargo, Yu (1973) demostró que las métricas L_1 y L_∞ definen un subconjunto del conjunto eficiente llamado conjunto compromiso. En otras palabras, la función de distancia L_p es monótona decreciente en el parámetro p. Por tanto, las «soluciones compromiso» correspondientes a cualquier métrica caerán dentro del intervalo de «soluciones compromiso» definido por las métricas L_1 y L_∞. En definitiva, las soluciones correspondientes a los programas lineales (6) y (8) caracterizan los límites del conjunto compromiso.

Este tipo de consideraciones de tipo teórico nos conducen a conclusiones prácticas de gran relevancia. Así, para el caso estudiado sea cual sea la métrica que mejor refleja la estructura de preferencias del centro decisor el plan forestal óptimo o plan de máxima utilidad estará muy probablemente comprendido entre los límites que definen el conjunto compromiso. Así, el plan forestal óptimo consistirá en obtener un volumen de madera durante el período de conversión comprendido entre 2.260.123 y 2.284.452 m^3, con un valor actual de la madera comprendido entre 876.901P y 869.366P ptas. y con una uniformidad en la producción comprendida entre 0 y 71.266 m^3.

La programación compromiso constituye un procedimiento eficaz para determinar de entre el conjunto de soluciones eficientes una solución adecuda. Ahora bien, existen procedimientos alternativos para abordar esta tarea. Así, resulta bastante eficaz en algunos casos recurrir a las llamadas técnicas interactivas. Este enfoque se basa en una definición progresiva de las preferencias del centro decisor, estableciéndose una interacción entre el modelo y el centro decisor. La interacción se concreta en una especie de conversación en la que al centro decisor se le pregunta acerca de sus preferencias o intercambios. Un análisis crítico de los principales métodos interactivos puede verse en Romero & Rehman (1989, cap. 6).

V. PLANIFICACION FORESTAL CON CRITERIOS MULTIPLES: BIBLIOGRAFIA COMENTADA

En los dos últimos apartados se ha pretendido mostrar la utilidad de los métodos decisionales multicriterio en planificación forestal. Ahora bien, las características del caso práctico elegido pueden plantear algunas dudas al lector acerca de la potencialidad de este enfoque. Así, cabe preguntarse si la programación multicriterio es un instrumento útil para abordar problemas forestales diferentes del de obtener un bosque regulado en un plazo de tiempo determinado. Otra posible fuente de dudas puede deberse al carácter muy economicista de los objetivos considerados. Dicho con otras palabras, hasta qué punto el enfoque multicriterio es útil cuando los objetivos a considerar son de naturaleza ecológica (e.g. mantenimiento de la fauna) o sociales (e.g. actividades recreacionales). Tanto para aclarar este tipo de dudas como para que el lector tenga una información más completa acerca de las posibilidades de la programación multicriterio en temas forestales se va a realizar en este apartado una revisión bastante exhaustiva de la literatura existente sobre este tema (3).

Field en 1973 fue el primer investigador que analizó un problema de planificación forestal dentro de un marco multicriterio. En su trabajo Field planifica un bosque de propiedad privada de 600 acres considerando tres objetivos: ingreso familiar, producción de madera y actividades recreativas. Los tres objetivos comentados se integran en un modelo de programación por metas lexicográficas.

El trabajo de Field supone el punto de partida de una interesante tradición en la que se plantean los problemas de planificación forestal dentro de un contexto de objetivos múltiples. Esta tradición se ha concentrado fundamentalmente en lo que se denomina el problema del manejo del bosque (*forest management problem*). En este problema las variables decisionales x_{ij} representan la superficie a asignar al i-ésimo uso posible del suelo en la j-ésima región geográfica. El proceso de optimización se realiza en base a objetivos de naturaleza muy diversa. Estos objetivos incluyen niveles de beneficio, mantenerse dentro de los límites presupuestarios, producción de madera, actividades recreativos y de caza, conservación de la fauna, etc. La mayor parte de estos objetivos se encuentran en conflicto por lo que debe de buscarse un compromiso entre los mismos.

Dentro de este campo de aplicaciones Bottoms & Bartlett (1975), Schuler & Meadows (1975), Schuler et al. (1977), Kahalas & Groves (1978) y Arp & Lavigne (1982) recurren a modelos de programación por metas lexicográficas. Dane et al. (1977) han usado programación por metas ponderadas, mientras que Steuer & Schuler (1978), De Kluyver et al. (1980) y Hallefjord et al. (1986) han recurrido a modelos multiobjetivo de tipo interactivo. Chang & Buongiorno (1981) han combinado la programación por metas lexicográficas con el análisis input-output.

El siguiente campo de aplicación del enfoque multicriterio en planificación forestal es la planificación del turno de corte (*timber harvest scheduling*). En tal tipo de problemas las variables de

(3) Este apartado constituye una ampliación del apartado 5 del trabajo de Romero & Rehman (1987).

decisión x_{ij} representan las superficies a cortar correspondientes al grupo de edad j-ésimo en el período de tiempo i-ésimo. El plan óptimo se establece considerando varios objetivos simultáneamente tales como: producción de madera, valor actual de la madera, producción uniforme de madera, regulación perfecta del bosque, etc. El caso práctico presentado en los apartados anteriores cae dentro de este tipo de problemas.

La planificación del turno de corte ha sido analizado dentro de un enfoque de programación por metas lexicográficas por Kao & Brodie (1979), Field et al. (1980), Hotvedt et al. (1982) y Hotvedt (1983). Por otra parte, Ritters et al. (1982) y Mendoza (1988) han atacado el mismo problema recurriendo a la programación multiobjetivo y Bare & Mendoza (1988) utilizando enfoques interactivos. Cabe destacar que en estos dos últimos trabajos se consideran además del objetivo tradicional de maximización de la producción de madera otro objetivo que pretende maximizar el número de animales de ciertas especies beneficiosas que puede soportar el bosque.

Seguidamente vamos a comentar otras aplicaciones realizadas con un enfoque multicriterio en el terreno de la planificación forestal. Así, Walker (1985) recurre a un modelo interactivo de programación por metas lexicográficas para analizar un problema de reforestación. Poterfield (1976) recurriendo a la programación por metas lexicográficas y Mattheiss & Land (1984) usando programación multiobjetivo estudian programas de mejora donde los objetivos considerados son caracteres genéticos. Mitchell & Bare (1981) aplican la programación por metas ponderadas a un problema de muestreo estratificado para diseñar un inventario forestal. Mendoza *et al.* (1986, 1987) utilizan un modelo multiobjetivo interactivo para planificar los regímenes óptimos de un sistema agro-forestal. Finalmente, Bertier & Montgolfier (1974) recurren a una técnica discreta de programación multicriterio (método ELECTRE) para elegir entre un conjunto de siete proyectos alternativos de autopista, considerando en el proceso decisional factores ambientales que dañan a los bosques circundantes.

BIBLIOGRAFIA

ARP, P.A. y LAVIGNE, D.R. (1982): «Planning with goal programming: A case study for multiple-use of forested land». *Forestry Chronical,* Vol. 58: 225-232 páginas.

BARE, B. y MENDOZA, G. (1988): «Multiple objetive forest land management planning: An illustration». *European Journal of Operational Research,* Vol. 34: 44-55 páginas.

BERTIER, P. y MONTGOLFIER, J. (1974): «On multicriteria analysis: An application to a forest management problem». *Metra,* Vol. 13: 33-45 páginas.

BOTTOMS, K.E. y BARTLETT, E.T. (1975): «Resource allocation through goal programming». *Journal Range Management,* Vol. 28: 442-447 páginas.

BUONGIORNO, J. y GILLES, J.K. (1987): *Forest management and economics,* New York, MacMillan.

CHANG, S.J. y BUONGIORNO, J. (1981): «A programming model for multiple use forestry». *Journal of Environmental Management,* Vol. 13: 41-54 páginas.

COMPUING & SYSTEMS CONSULTANTS BV (1987): *Multi objetive linear programming* (Reference Manual). Eindhoven.

DANE, C.W., MEADOR, N.C. y WHITE, J.B. (1977): «Goal programming in land-use planning». *Journal of Forestry,* n.° 7: 325-329 páginas.

DE KLUYVER, C.A., DAELLENBACH, H.G. y WHYTE, A.G.D. (1980): «A two-stage, multiple objetive mathematical programming approach to optimal thinning and harvesting». *Forest Science,* Vol. 26: 674-686 páginas.

FIELD, D.B. (1973): «Goal programming for forest management». *Forest Science,* Vol. 19: 125-135 páginas.

FIELD, R.C., DDRESS, P.E. y FORTSON, J.C. (1980): «Complementary linear and goal programming procedures for timber harvest scheduling». *Forest Science,* Vol. 26: 121-133 páginas.

HALLEFJORD, A., JÖRNSTEN, K. y ERIKSSON, O. (1986): «A long range forestry planning problem with multiple objectives». *European Journal of Operational Research,* Vol. 26: 123-133 páginas.

HOTVEDT, J.E. (1983): «Application of linear goal programming to forest harvest scheduling». *Southern Journal of Agricultural Economics,* Vol. 15: 103-108 páginas.

HOTVEDT, J.E., LEUSCHNER, W.A. y BUHYOFF, G.J. (1982): «A heuristic weight determination procedure for goal programs used for harvest scheduling models». *Canadian Journal of Forestry,* Vol. 12: 292-298 páginas.

JOHANSSON, P-O y LÖFGREN, K-G. (1985): *The economics of forestry and natural resources.* Oxford, Basil Blackwell.

KAHALAS, H. y GROVE, D.L. (1978): «Modeling for organizational decision-making: Profit vs social values in resource management». *Journal of Environmental Management,* Vol. 6: 73-84 páginas.

KAO, C. y BRODIE, J.D. (1979): «Goal programming for reconciling economic, even flow, and regulation objectives in forest harvest scheduling». *Canadian Journal of Forest Research,* Vol. 9: 525-531 páginas.

KULA, E. (1988): *The economics of forestry. Modern theory and practice.* Londres, Croom Helm.

MATTHEISS, T.H. y LAND, S.B. (1984): «A tree breeding strategy based on multiple objective linear programming». *Interfaces,* Vol. 14: 96-104 páginas.

MENDOZA, G.A. (1988): «A multiobjective programming framework for integrating timber and wildlife management». *Environmental Management,* Vol. 12: 163-171 páginas.

MENDOZA, G.A., CAMPBELL, G.E. y ROLFE, G.L. (1986): «Multiple objetive programming: An approach to planning and evaluation of agroforestry systems - Part 1: Model description and development». *Agricultural Systems,* Vol. 22: 243-253 páginas.

MENDOZA, G.A., CAMPBELL, G.E. y ROLFE, G.L. (1987): «Multiple objetive programming: An approach to planning and evaluation of agroforestry systems - Part 2: An illustrative example and analysis». *Agricultural Systems,* Vol. 23: 1-18 páginas.

MITCHELL, B.R. y BARE, B.B. (1981): «A separable goal programming approach to optimizing multivariate sampling designs for forest inventory». *Forest Science,* Vol. 27: 147-162 páginas.

NAUTIYAL, J.C. y PEARSE, P.H. (1967): «Optimizing the conversion to sustained yield -A programming solution». *Forest Science,* Vol. 13: 131-139 páginas.

PORTERFIELD, R.L. (1976): «A goal programming model to guide and evaluate tree improvement programs». *Forest Science,* Vol. 22: 417-430 páginas.

RITTERS, K., BRODIE, J.D. y KAO, C. (1982): «Volume versus value maximization illustrated for Douglas-Fir with thinning«. *Journal of Forestry,* Vol. 80: 86-89 y 107 páginas.

ROMERO, C. (1985): «Naive weighting in non-preemptive goal programming -Letter to the Editor». *Journal of the Operational Research Society,* Vol. 36: 646-648 páginas.

ROMERO, C. y REHMAN, T. (1987): «Natural resources management and the use of multiple criteria decision making techniques: A review». *European Review of Agricultural Economics,* Vol. 14: 61-89 páginas.

ROMERO, C. y REHMAN, T. (1989): *Agricultural decision analysis with multiple criteria.* Amsterdam, Elsevier.

SCHULER, A. y MEADOWS, J.C. (1975): «Planning resource use on national forests to achyieve multiple objectives». *Journal of Environmetal Management,* Vol. 3: 351-366 páginas.

SCHULER, A.T., WEBSTER, H.H. y MEADOWS, J.C. (1977): «Goal programming in forest management». *Journal of Forestry,* Vol. 75: 320-324 páginas.

STEUER, R.E. y SCHULER, A.T. (1978): «A interactive multiple objective linear programming approach to a problem in forest management». *Operations Research,* Vol. 26: 254-269 páginas.

WALKER, H.D. (1985): «An alternative approach to goal programming». *Canadian Journal of Forest Research,* Vol. 15: 319-325 páginas.

YU P.L. (1973): «A class of solutions for group decision problems». *Management Scienci,* Vol. 19: 936-946 páginas.

ZELENY, M. (1973): «Compromise programming», en J.L. Cochrane y Zeleny, M. (eds.), *Multiple Criteria Decision Making.* Columbia, University of South Carolina Press, 262-301 páginas.

ZELENY, M. (1974): «A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal». *Computers and Operations Research,* Vol. 1: 479-496 páginas.

RESUMEN

Este artículo pretende mostrar las posibilidades de la teoría de la decisión multicriterio en el campo de la planificación forestal. Con tal propósito se parte de un caso práctico de regulación de un bosque. El problema se resuelve inicialmente de la manera tradicional por medio de la programación lineal. Seguidamente, se analiza el mismo problema desde una óptica multicriterio recurriendo para ello a la programación multiobjetivo y a la programación compromiso. Se finaliza el artículo realizando una revisión de los trabajos publicados de planificación forestal dentro de un enfoque multicriterio.

RESUME

Cet article pretend montrer les possibilités de la theorie de decision multicritère dans le champs de la planificación forestière. Un cas pratique de regulation d'une foêt est exposé. Le problema est resolu initialement en utilisant la programmation linéaire traditionnelle. Par la suite, le même probleme est analysé du point de vue multicritère en utilisant la programmation multiobjetive et la programmation par compromis. L'article se termine par une révision bibliographique des travaux publiés sur la planification forestière ayant utilisés la theorie de decision multicritère.

SUMMARY

This paper pretends to show the possibilities of the multiple criteria decision making theory in forestry planning. The starting point is a case of regulation of an even-aged forest. The problem is initially solved in the traditional way by using linear programming. Afterwards the same problem is analysed from a multiple criteria perspective resorting to multiobjective and compromise programming approaches. The article finishes with a critical survey of papers on forestry planning written within a multiple criteria pespective.