

ORDENACIÓN DE MONTES APLICANDO TÉCNICAS BASADAS EN LA PROGRAMACIÓN LINEAL: ANÁLISIS MODELOS I Y II

C. REDONDO MARINA; L. DÍAZ BALTEIRO
ETS Ingenierías Agrarias. Avda. Madrid, 57, 34071 PALENCIA

RESUMEN

A diferencia de otros países, la aplicación en la gestión forestal de técnicas basadas en la programación matemática todavía no se ha extendido entre los proyectos de ordenación de nuestros montes. En este trabajo se realiza una aplicación de los dos modelos de manejo forestal basados en la programación lineal más habitualmente citados en la literatura (modelo I y modelo II) al Grupo de Montes de Pinilla de los Barruecos (Burgos). Para la construcción de ambos modelos se han considerado diversos objetivos, tanto económicos (VAN) como selvícolas (volumen total, volumen de chapa). Además, se ha considerado explícitamente un objetivo ambiental, a través de la inclusión de cuatro áreas recreativas en el monte. Los resultados obtenidos se han comparado con los resultados del reciente proyecto de ordenación utilizando la metodología tradicional, obteniéndose unas soluciones robustas, que dominan a las proporcionadas por el proyecto de ordenación original, y que facilitan al gestor una gran cantidad de información acerca de las relaciones existentes entre los objetivos considerados. Por último, se han comparado entre sí las soluciones obtenidas por los modelos I y II.

P.C.: ordenación de montes, programación lineal

SUMMARY

In opposition to other countries, the application in forest management of analytical methods based on mathematical programming has not still extended among the Spanish forest management projects. An application of the two models of forest management based on lineal programming more habitually mentioned in the literature (model I and model II) is fruitfully applied to the Spanish forest "Grupo de Montes de Pinilla de los Barruecos (Burgos)". In both models diverse objectives have been considered: economic objectives (maximise NPV) and silvicultural goals as (maximise total volume, maximise veneer volume). Also, an environmental objective has been explicitly considered, through the inclusion of four recreational areas in the forest. The results obtained have been compared with the outcome of the recent forest management project using the traditional methodology, not based in any optimisation model. In all cases a feasible solution was found. Besides, this solutions dominate to the obtained using the traditional methodology and they facilitate to the manager a great quantity of information about the existent relationships among the considered objectives. Finally, the solutions obtained by the model I and II have been compared.

K.W.: forest management, linear programming

INTRODUCCIÓN, MATERIAL Y MÉTODOS:

La ordenación de montes empleando técnicas basadas en la programación matemática todavía no ha encontrado un gran desarrollo en nuestro país, a pesar de su potencialidad y su amplia expansión en otras zonas del mundo. Aunque actualmente se están empleando en este campo numerosas técnicas de la Investigación Operativa, es indudable que la programación lineal es todavía la herramienta más utilizada. Empleando datos reales de un proyecto de ordenación se van a comparar los dos modelos de programación lineal tradicionalmente definidos en este tipo de problemas. Siguiendo la clasificación de Johnson & Scheurman (1977) serían el modelo I y el modelo II.

El grupo de montes objeto de este estudio se sitúan en el sureste de la provincia de Burgos, cerca del límite con Soria, alcanzando una altitud media de 1100 m. Este grupo de montes, inscrito en el Catálogo de Montes de Utilidad Pública, comprende 2 montes ni siquiera unidos físicamente que presentan características forestales muy distintas. El monte "Abajo", con cabida de 639,70 ha presenta como especie principal el roble (*Quercus pyrenaica Willd.*). El otro monte que pertenece al grupo, el monte "Pinar", presenta una cabida forestal de 1182,73 ha. Como especies principales aparecen el pino silvestre (*Pinus sylvestris L.*), el pino negral (*Pinus pinaster Ait.*) y la sabina (*Juniperus thurifera L.*). Estas tres especies se presentan en rodales dominados por una especie, o en mezclas más o menos íntimas de pino silvestre con pino negral, o de pino silvestre con sabina, siendo el pino silvestre el más abundante. El reciente proyecto de ordenación (VV.AA., 1999) opta por aplicar el método del tramo único con turno de 120 años para el monte "Pinar". Ambos montes se dividen en dos cuarteles,

el A ocupado completamente por el robledal, con un objetivo de protección-producción, y el cuartel B con un uso preferente de producción- protección. Dada la heterogeneidad de este grupo de montes, la planificación forestal a la que se refieren los próximos apartados se va a circunscribir exclusivamente al monte "Pinar".

Una vez vistas las principales características del monte en cuestión, a continuación se va a describir brevemente la metodología utilizada para construir modelos de planificación forestal estratégica. Esta técnica se ha convertido, en pocos años, en una herramienta de referencia a la hora de optimizar la programación de cortas que se va a seguir en un monte, de acuerdo a diversos objetivos. Elementos comunes a ambos modelos serían el horizonte de planificación o turno de transformación, que en este caso se ha tomado 100 años, y el número de períodos en que se divide dicho horizonte de planificación (10 períodos). Con el fin de dotar de una mayor flexibilidad al modelo, se ha considerado no un turno único como ocurre en el proyecto de ordenación del monte, sino un rango de variación, que, tanto para el pino silvestre como para el pino negral, oscila entre los 80 y los 140 años. Por otro lado, habría que definir las prescripciones o programas de manejo para cada unidad de gestión [clase de edad y calidad de estación] considerada en el monte. Aquí difieren ambos modelos. Así, en el modelo I se definen en el momento inicial y van a permanecer inalteradas a lo largo del horizonte de planificación, mientras que en el modelo II cada vez que se produce una corta de regeneración todas las superficies de la misma calidad de estación, cortadas en el mismo momento definen una nueva unidad de manejo que permanece como tal desde ese momento hasta su corta o bien hasta el final del horizonte de planificación. Por lo tanto, y a diferencia del modelo I, no existe una vinculación unívoca de una prescripción con una unidad de manejo que se mantiene constante a lo largo del turno de transformación considerado.

Toda estructura de un problema en el que se emplee la programación lineal requiere de una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. Como funciones objetivo se han considerado tres: la maximización del volumen total de madera obtenido del monte, objetivo que coincide con el establecido en el proyecto de ordenación para este monte, la maximización del valor actual neto (VAN), y la maximización del volumen de chapa obtenido. Maximizar el VAN se puede justificar no sólo por el hecho de obtener un índice de rentabilidad asociada a los productos tangibles obtenidos en ese monte, sino por la información diferencial que puede proporcionar al gestor en términos de comparar diversas alternativas de gestión. Por último, el volumen de chapa representa el volumen destinado al destino de mayor valor comercial, y que está cobrando cada vez más importancia en numerosos montes cuya especie principal sea *P. sylvestris*. En cuanto a las restricciones, además de las restricciones endógenas imprescindibles, se han elegido las siguientes: igualdad de los flujos de volumen en cada uno de los 10 períodos considerados, consecución de un inventario final al término del horizonte de planificación que sea por lo menos igual al existente en el momento inicial, y obtención de la condición de regulación, que asegura que al final de la actuación cada clase de edad ocupe la misma superficie. Por último, dado que una de las singularidades más destacables del monte objeto de estudio radica en la presencia de cuatro áreas recreativas se ha introducido una alguna restricción para mantener las potencialidades de uso social de estas zonas.

Para poder aplicar estos objetivos y restricciones es necesario realizar una serie de supuestos. Así, para poder maximizar el volumen es preciso conocer el volumen de la masa en los períodos futuros, según cada calidad de estación. Una deficiencia importante encontrada en el proyecto de ordenación es que no se presentan datos de alturas dominantes, razón por la cual se desconoce la correspondencia de las diferentes calidades de estación con las definidas en las tablas de producción, por lo que se ha tenido que adjudicar cada rodal a una calidad de estación determinada. En Redondo (2000) se detalla el procedimiento seguido para la asignación de estas calidades de estación. En cuanto al cálculo del VAN, únicamente se han considerado como ingresos los provenientes de la venta de la madera asociada a una corta de regeneración, ya que el resto de los aprovechamientos tienen un carácter secundario y de acuerdo con el proyecto de ordenación del monte, representan un porcentaje de ingresos inferior al 10% del total. También se ha añadido el porcentaje de los ingresos incluido en el fondo de mejoras, estimado en función de los ingresos obtenidos durante el último decenio. La tasa de descuento elegida para estos cálculos es del 2%. Como precios de referencia se han considerado los aplicados durante 1999 en la Sección Territorial 2ª del Servicio de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León en Burgos. Por último, para el cálculo del volumen de chapa se ha partido de los datos aportados por Montero et al. (1992).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, es preciso destacar el hecho de que para las distintas funciones objetivo y restricciones introducidas, la solución obtenida es siempre factible, con independencia del tipo de modelo utilizado. Es decir, siempre existirá una combinación posible de cortas a lo largo de los próximos 100 años que cumpla los objetivos marcados por el centro decisor. Aunque se han optimizado las distintas funciones objetivos para las restricciones introducidas, únicamente se van a exponer los resultados obtenidos cuando se introducen simultáneamente todas las restricciones.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos cuando se maximizan cada uno de los 3 objetivos, cumpliendo simultáneamente las 3 restricciones, y utilizando el Modelo I. Así, además conocer que el inventario final en los 3 casos es de 127.749 m³ cuando acabe el horizonte de planificación señalado, y que cada una de las clases de edad ocupará la quinta parte de la superficie del monte (231,14 ha), los datos referentes a los 3 objetivos revelan un cierto grado de conflicto entre los mismos, sobre todo cuando se tiene en cuenta el volumen de chapa. En efecto, aunque los resultados son bastante parejos comparando el maximizar el volumen total o el VAN, cuando se considera el volumen de chapa las diferencias son más notorias. Por ejemplo, el maximizar el volumen supone renunciar a más del 60% de la chapa que se obtendría si ésta fuera el objetivo a maximizar. Básicamente se puede afirmar que maximizar el volumen de chapa supone obtener una solución en donde los turnos medios de las prescripciones son un 8% más largos, y en donde las cortas de cada período son un 10% menores que cuando se tiene en cuenta otro objetivo contemplado en el análisis. Asimismo, el VAN se reduce en un 15%. También cabría preguntarse por la importancia de las restricciones. Es decir, cuál sería el coste en términos de unidades de la función objetivo, de asumir las tres restricciones a la vez. Como se puede comprobar en la Tabla 1 [columna “% reducción objetivo”], el coste oscila desde un 25,5% en términos de volumen total hasta más de un 40% en términos de volumen de chapa.

Como se ha comentado en el apartado anterior, en el monte existen una serie de áreas recreativas que se deben mantener en el turno de transformación. Lógicamente, el valor recreativo de estas superficies puede verse afectado por las cortas previstas en las superficies adyacentes. Se han simulado diversos valores de superficie sin cortar en los rodales donde se ubican estas áreas (desde 2 ha hasta el rodal entero), y los resultados muestran que en términos de VAN su coste oscila entre un 2% si únicamente se respetan 2 ha sin cortar hasta el 23% del VAN obtenido, si se deja sin cortar cada uno de los rodales en los que se encuentra el área recreativa. En términos de volumen el coste de oportunidad es ligeramente inferior: de un 1% hasta un 13,5% en los mismos casos.

El entorno de trabajo que se ha empleado para realizar este estudio ha sido claramente determinista. Sin embargo parece una hipótesis muy fuerte asumir que ninguno de los parámetros introducidos en el modelo pueda experimentar cambios a lo largo de un horizonte temporal tan dilatado. Para mitigar esta debilidad se ha realizado un análisis de sensibilidad con respecto a diversos parámetros que intervienen tanto en el VAN (precio de la madera, tasa de descuento) como en las cortas (% de mezcla entre *P. sylvestris* y *P. pinaster* en aquellos rodales donde coexisten ambas especies). En el caso de la tasa de descuento, se ha repetido el modelo para tasas que oscilan entre el 1 y el 4%. Tanto los turnos medios como los objetivos se comportan de manera inelástica frente a variaciones de la tasa de descuento cuando se consideran en el análisis las 3 restricciones simultáneamente, salvo el VAN. Para este objetivo las variaciones son bastante sustanciales. Así, una reducción de la tasa de descuento hasta el 1% aumenta el VAN en un 47%, y un aumento hasta el 3% lo reduce en un 27%.

En cuanto a cambios en el precio de la madera, se han considerado variaciones del 5, 10 y 25 % en ambos sentidos (incrementos y decrementos). Los resultados muestran una acusada inelasticidad de los objetivos volumen y volumen de chapa. En cambio, el VAN sufre importantes variaciones, mostrando una elevada elasticidad (incrementos y decrementos que oscilan el 50%) ante estos cambios en el nivel de precios. Por último, en los cálculos precedentes se había considerado para el turno de transformación un porcentaje de mezcla en los rodales mixtos entre el pino silvestre y el pino negral del 50 %. Si se modifica el porcentaje de estas especies en la mezcla, se observa que tanto el VAN como el volumen de corta y el turno apenas se modifican. Sin embargo, el volumen de chapa alcanza un máximo cuando el porcentaje de pino silvestre en la mezcla es del 70 %, debido a que únicamente se considera esta especie como productora de madera con este destino.

Si se comparan los resultados obtenidos con los presentados en el Proyecto de Ordenación del monte (VV.AA., 1999), se obtienen resultados diferentes en parámetros como la posibilidad de regeneración. Por ejemplo, si se compara la posibilidad de regeneración de los 10 años del plan especial del proyecto de ordenación con el primer periodo de planificación en el caso en que se maximice el volumen sujeto a todas las restricciones consideradas, ésta es un 43 % inferior a la obtenida con este modelo de optimización. Estos resultados no son extraños al realizar este tipo de comparación (véase Díaz Balteiro & Prieto, 1999) debido a la naturaleza optimizadora del modelo y al carácter estratégico de la planificación. Si se descendiera a niveles tácticos u operativos, estos volúmenes de corta apuntados descenderían. Por otro lado, los turnos medios obtenidos, aunque parejos en ambos modelos, son ligeramente más reducidos que en el proyecto de ordenación (120 años).

A continuación se van a presentar los resultados más relevantes que se han obtenido con el empleo del modelo II. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos cuando se tienen en cuenta los mismos objetivos y restricciones que en el modelo I. Se puede apreciar cómo los resultados son muy similares en ambos modelos. Los porcentajes de variación con respecto a las soluciones en las que no se tienen en cuenta los tres conjuntos de restricciones son similares a los del modelo anterior. Únicamente se observan unas ligeras diferencias en cuanto a las cortas de cada período (ligeramente inferiores en el modelo II, para cualquier función objetivo), y al volumen de chapa. En efecto, en este modelo los volúmenes de chapa obtenidos son ligeramente superiores, sobre todo cuando se maximiza el VAN.

Comparando ambos modelos, se puede decir que la principal diferencia entre ambos radica en la manera en que son gestionadas las clases de edad presentes en el momento inicial. Así, mientras que el modelo I identifica unidades de manejo que se preservan a lo largo de todos los sucesivos períodos, el modelo II permite que ciertas superficies que en el momento inicial pertenecían a una cierta clase de edad, sean segregadas y combinadas con superficies de otras clases de edad iniciales, pero que tienen las cortas finales en el mismo período. Esta circunstancia proporciona una mayor flexibilidad al modelo II, que se traduce en un ahorro computacional inapreciable, pero a un coste elevado en términos de comprensión y seguimiento de las diferentes prescripciones definidas en el modelo. Se requiere para una interpretación correcta de las soluciones obtenidas con este modelo una visión dinámica para interpretar el establecimiento de las nuevas unidades de manejo después de corta (Rodrigues et al., 1999).

Por último, es preciso comentar la posibilidad de utilizar técnicas multicriterio como una vía de integrar los diferentes objetivos aquí planteados. Un ejemplo de la aplicación de estas técnicas a un problema similar puede verse en Díaz Balteiro & Romero (1998).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a través de la aplicación de los modelos I y II a la planificación estratégica del monte "Pinar" muestran, en primer lugar, soluciones factibles, con independencia de la función objetivo elegida, y que pueden ser aceptables por el gestor. En términos de VAN o volumen total cortado a lo largo del turno de transformación, hay poca divergencia si se toma un objetivo u otro. Las diferencias más acusadas aparecen cuando se intenta maximizar el volumen de chapa. Por otro lado, los turnos medios obtenidos son más cortos que los propuestos en el proyecto de ordenación, pero perfectamente asumibles. Los modelos aquí introducidos han mostrado su solidez mediante un análisis de sensibilidad que reafirma los resultados obtenidos. Por último, también pueden evaluar fácilmente el coste de oportunidad de reservar zonas adyacentes a las áreas recreativas situadas en el monte.

La comparación de ambos modelos produce resultados muy parejos, aunque el modelo II resulta más complicado de formular y de interpretar sus prescripciones. No se ha obtenido ningún ahorro computacional destacado a la hora de emplear este modelo. Finalmente, los resultados mostrados por ambos modelos dominan la solución incluida en el proyecto de ordenación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a los Ingenieros de Montes del Servicio de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Burgos, D. Julián Gonzalo, D. José Ignacio Pardo y D. Víctor Nebreda Ontañón tanto la información facilitada, como la desinteresada colaboración que han prestado en algunas fases de este trabajo. Por otro lado, el profesor de la ETS de Ingenierías Agrarias de Palencia, D. Felipe Bravo, ha aportado interesantes comentarios sobre la evolución de masas mezcladas de pino silvestre y pino negral. Indudablemente, cualquier error u omisión que se pueda encontrar en este trabajo corresponde exclusivamente a los autores. La aportación de Luis Díaz Balteiro está financiada por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- DÍAZ BALTEIRO, L. & PRIETO RODRÍGUEZ, A.; (1999). *Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte "Pinar de Navafría" (Segovia)*. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 8: 63-92.
- DÍAZ BALTEIRO, L. & ROMERO, C.; (1998). *Modeling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: An application in Spain*. Forest Science: 44(1): 47-57.
- 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.
- MONTERO, G.; ROJO, A. & ALÍA, R.; (1992). *Determinación del turno de Pinus sylvestris L. en el Sistema Central*. Montes 29: 42-47.
- REDONDO, C.; (2000). *Aplicación de técnicas de programación lineal a la gestión del grupo de montes de Pinilla de los Barruecos (Burgos): Resultados y discusión*. Proyecto Fin de Carrera ETS Ingenierías Agrarias, Sección Ingenieros de Montes, Palencia. (Inédito).
- RODRIGUES, F.L.; GARCIA, H.; LOPES DE SOUZA, A.; ÁLVARES, C. & LOPES DA SILVA, M.; (1998). *Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear: uma aplicação da teoria do Modelo II*. Revista Árvore 22 (2): 193-213.
- VV.AA. (1999). *2º Proyecto de ordenación del grupo de montes de Pinilla de los Barruecos. N° 248 del CUP "Abajo" y N° 250 del CUP "El Pinar" de la pertenencia al Ayuntamiento de Pinilla de los Barruecos*. Servicio Territorial de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Burgos. (Inédito).

Tabla 1. Principales resultados obtenidos empleando el Modelo I.

	VAN	Volumen	Volumen Chapa
VAN (*10⁶ pta)	488,979	476,475	392,460
Volumen (m³)	305.918	308.143	274.523
Volumen Chapa (m³)	8.468,1	5.854,8	15.221,5
% Reducción objetivo *	34,46%	25,55%	41,69%
Volumen de cortas en cada período (m³)	30.592	30.814	27.452
Turno medio	100	100	108

Tabla 2. Principales resultados obtenidos empleando el Modelo II.

	VAN	Volumen	Volumen Chapa
VAN (*10⁶ pta)	475,037	447,177	407,930
Volumen (m³)	298.304	300.027	268.966
Volumen Chapa (m³)	10.033.2	5.965.04	15.342.7
% Reducción objetivo *	35,38%	25,46%	41,22%
Volumen de cortas en cada período (m³)	29.830	30.003	26.897

Turno medio	102	101	107
--------------------	-----	-----	-----

Leyenda de ambas tablas:

Cada una de las columnas 2-4 se corresponde con la maximización del objetivo señalado, introduciendo simultáneamente las restricciones empleadas en el análisis.

* % Reducción objetivo muestra el porcentaje en que se reduce el valor de la función objetivo cuando se introducen todas las restricciones empleadas en el análisis.