

# MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA PARA LA RESOLUCIÓN DE MODELOS DE PLANIFICACIÓN FORESTAL

M. Palahí Lozano <sup>1</sup> y T. Pukkala <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Passeig Lluís Companys 23. 08010-BARCELONA (España). Correo electrónico: marc.palahi@ctfc.es

<sup>2</sup> University of Joensuu. Faculty of Forestry. P.O. Box 111. 80101-JOENSUU (Finland)

## Resumen

El presente estudio examinó cinco métodos de optimización heurística: *subida azarosa* (RA), *Hero*, *templado simulado* (SA), *búsqueda tabú* (TS) y *algoritmos genéticos* (AG), en el contexto de dos modelos de planificación forestal que consideraban explícitamente objetivos ecológicos para la preservación del hábitat del urogallo en Cataluña. Tales modelos fueron resueltos para dos problemas distintos (uno no-espacial y otro espacial) para un caso de estudio cuyo propósito era mejorar en un período de 60 años el hábitat del urogallo en un monte virtual de 14.400 ha compuesto mayoritariamente por rodales de *Pinus uncinata*, *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*. Una vez formulados, los dos problemas fueron resueltos mediante los cinco métodos de optimización heurística. En el primer problema, cuatro de los cinco métodos heurísticos; RA, HERO, SA y TS encontraron valores muy similares para la función objetivo, siendo GA claramente inferior y mucho más lento que el resto de los métodos. Por el contrario, en el caso del segundo problema de carácter espacial, GA fue el método que encontró el mejor valor de la función objetivo mientras que el resto de métodos encontraron soluciones casi idénticas. La razón por la que GA produce las mejores soluciones en el problema de optimización espacial, podría deberse a su proceso de búsqueda, el cual es muy diferente al de los otros métodos empleados. GA, al contrario que RA, HERO, SA y TS no basa su proceso de búsqueda en llevar a cabo mejoras locales en un entorno, sino basa su estrategia de búsqueda en la recombinación de soluciones, lo cual le permite examinar en cada iteración múltiples cambios respecto a una misma solución.

Palabras clave: *Objetivos ecológicos, Optimización heurística, Planificación forestal multiobjetivo*

## INTRODUCCIÓN

Durante la década de los años 80, técnicas típicas de la investigación operativa, como la programación lineal, comenzaron a reemplazar a los métodos clásicos de ordenación en el contexto de la planificación de la gestión forestal (JOHNSON & TEDDEER, 1983). El uso de estas técnicas conjuntamente con técnicas de simula-

ción basadas en modelos de crecimiento mejoró la capacidad de análisis respecto a las múltiples alternativas de decisión existentes en los problemas de planificación forestal. Aún y así, la aplicación de la programación matemática se ha encontrado con limitaciones importantes para resolver problemas actuales cada vez más complejos, por ejemplo cuando aspectos espaciales relacionados con objetivos ecológicos (conecti-

vidad y tamaño de diferentes hábitat, etc) han de ser integrados en los problemas de planificación forestal (BORGES et al., 2002; PALAHÍ, 2002; PUKKALA, 2002). La complejidad computacional de tales problemas y su carácter combinatorio han propiciado un mayor uso de técnicas heurísticas con el fin de optimizar la gestión forestal. Recientemente, diversos estudios han comparado diferentes métodos heurísticos en el contexto de la planificación de la gestión forestal (e.g., BOSTON & BETTINGER, 1999; BETTINGER et al., 2002; BOSTON & BETTINGER, 2002; CROWE & NELSON, 2002; FALÇAO & BORGES, 2002; NALLE et al., 2002). El objetivo de este estudio es el de examinar cinco métodos heurísticos en el contexto de dos modelos de planificación forestal que consideran explícitamente objetivos ecológicos para la preservación del hábitat del urogallo en Cataluña. Las formulaciones de los modelos son aplicaciones de la teoría de la utilidad multi-atributo (siendo las funciones objetivo modelos de utilidad aditivo).

## HEURÍSTICOS EXAMINADOS

Los métodos heurísticos examinados fueron *Random ascent* (RA), *Hero*, *Simulated annealing* (SA), *Tabu search* (TS) y *Genetic algorithms* (GA). TS, GA and SA son los métodos heurísticos más utilizados en la resolución de problemas combinatorios (ver REEVES, 1993), mientras que *Hero* ha sido muy utilizado en la resolución de problemas de planificación forestal formulados mediante funciones de utilidad multi-atributo (MAUT) (ver PUKKALA Y KANGAS, 1993). RA es utilizado como método referencia ya que debido a su proceso de búsqueda cualquier otro método heurístico debería resultar más efectivo que este.

Los métodos usados en este artículo se explican detalladamente en REEVES (1993), BORGES et al. (2002) y BETTINGER et al. (2002). A continuación se describen brevemente.

### **Random ascent (RA)**

En RA se produce una solución inicial asignando aleatoriamente un régimen selvícola a cada unidad mínima de gestión. A continuación, una unidad mínima de gestión y un nuevo régimen selvícola para este son seleccionados alea-

toriamente. En caso de que el nuevo régimen mejore el valor de la función objetivo, este es incluido en la solución. Este proceso de búsqueda se repite hasta que un número máximo de iteraciones es alcanzado.

### **Hero**

En *Hero* (ver PUKKALA & KANGAS, 1993) en primer lugar, un régimen selvícola es seleccionado aleatoriamente para cada unidad mínima de gestión, produciendo así una solución inicial. En segundo lugar, de uno en uno cada una de las unidades de gestión son examinadas secuencialmente con el objeto de comprobar si otro régimen selvícola mejoraría el valor de la función objetivo. En caso afirmativo, el régimen que hace mejorar la función objetivo substituye al previo.

### **Simulated annealing (SA)**

En SA se produce una solución inicial asignando aleatoriamente un régimen selvícola para cada unidad mínima de gestión. A continuación, una unidad mínima de gestión y un nuevo régimen selvícola para esta son seleccionados aleatoriamente. Con el objeto de evitar una convergencia prematura en un óptimo local, SA, además de aceptar todo movimiento de mejora (de la función objetivo), acepta también movimientos de no mejora de acuerdo con unas probabilidades. Más detalles en DOWSLAND (1993).

### **Tabu search (TS)**

La característica principal de TS es el uso de una lista tabú la cual condiciona el proceso de búsqueda, por ejemplo mediante la prohibición de repetir movimientos recientes. Como en los métodos previos, TS comienza su búsqueda a partir de una solución inicial aleatoria. A continuación, de entre los movimientos alternativos se selecciona el movimiento no-tabú que produzca la mejor solución. Más detalles en GLOVER & LAGUNA (1993).

### **Genetic algorithms (GA)**

En GA, las soluciones alternativas se llaman cromosomas padres, los cuales evolucionan a través de su recombinación (combinando partes de dos o más cromosomas) y de mutaciones (a través de un cambio aleatorio en uno o varios genes, que hacen referencia a las unidades míni-

mas de gestión). Tales operaciones resultan en un nuevo cromosoma (descendiente). En nuestro estudio, cada nuevo cromosoma substituye a uno de la generación anterior, el cual es seleccionado en base a una función de probabilidad que depende del valor de su función objetivo. Más detalles en REEVES (1993).

## MATERIAL

El presente estudio se llevo a cabo en un paisaje forestal artificial típico de zonas de montaña en Cataluña donde puede encontrarse el urogallo. El sistema forestal estaba formado por 900 unidades mínimas de gestión de 16 ha cada una, distribuidas en una malla cuadrada de 30 x 30 celdas. La superficie total del sistema era de 14.400 ha, el cual fue creado a partir de datos reales del Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN) (ICONA, 1993), seleccionando todas aquellas parcelas compuestas por *Pinus uncinata*, *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* localizadas entre los 1000 y 1900 metros de altitud. A continuación, los datos de inventario del sistema forestal fueron introducidos en el programa de planificación forestal MONTE (PUKKALA, 2003) con el objeto de simular 9 regimenes selvícolas alternativos para cada unidad mínima de gestión (para más detalles ver PALAHÍ, 2002). Tales simulaciones se realizaron para un periodo de planificación de 60 años basándose en los regimenes selvícolas óptimos encontrados por PALAHÍ & PUKKALA (2003) y en los modelos de crecimiento de árbol individual para *P. sylvestris* y *P. nigra* desarrollados por TRASOBARES et al. (2004). También fueron utilizados modelos para *P. uncinata* desarrollados, aunque no publicados, por el mismo Trasobares.

### Formulación de los problemas de planificación

Los cinco métodos heurísticos fueron utilizados en dos problemas de planificación que tenían la misma finalidad; mejorar la calidad del sistema forestal en relación al hábitat del urogallo y obtener el máximo de madera a través de claras y cortas. Las funciones objetivo de los dos problemas fueron formuladas como modelos aditivos de utilidad:

$$U = 0.6u_h(H) + 0.4u_l(L_{12063}) \quad (1)$$

donde  $U$  es la Utilidad total,  $u_h$  es la utilidad parcial derivada del volumen total de madera cortada durante el periodo de 60 años,  $u_l$  es la utilidad parcial derivada del objetivo ecológico representado por una determinada variable de paisaje  $l$  al final del periodo de planificación.  $H$  y  $L_{12063}$  son, respectivamente, el volumen total cortado y el valor de la variable de paisaje  $l$  al final del periodo.

En el *Problema 1* se refiere a la *proporción de hábitat* (%HSI) de urogallo que es una variable cuantitativa de la composición del paisaje que indica la cantidad relativa de unidades mínimas de gestión aptas como hábitat para el urogallo. Para determinar si una unidad mínima de gestión era apta como hábitat de urogallo se empleó el *índice de adecuación de hábitat* (HSI) de urogallo desarrollado por PASCUAL (2003), y calculado en función de la composición arbórea y estructura de cada unidad mínima de gestión (más detalles en PALAHÍ et al. (2004)).

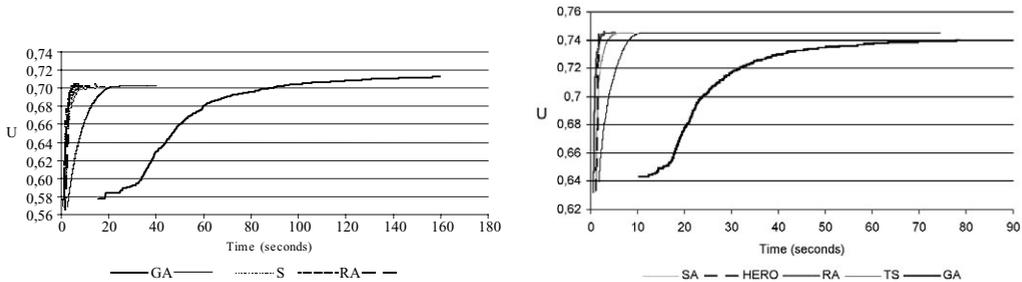
En el *Problema 2* se refiere a la *proporción de límites separando unidades mínimas de gestión* (celdas) clasificados como hábitat (H-H) y por lo tanto proporciona información acerca de la configuración espacial del paisaje (KURTILLA et al., 2002; PALAHÍ et al., 2004).

## RESULTADOS

Para comparar los cinco métodos heurísticos, los Problemas 1 y 2 fueron solucionados con cada una de las técnicas. El problema 1 no representaba un problema espacial, mientras que el problema 2 al maximizar H-H en lugar de %HSI requería además de la información producida en las simulaciones, de información de adyacencia entre las unidades mínimas de gestión.

Para evaluar la calidad de las soluciones de cada heurístico fueron evaluados el valor máximo de la función objetivo, la media de los valores obtenidos en 10 optimizaciones, y el tiempo medio consumido por cada método.

En el problema no espacial (1) cuatro de los cinco métodos heurísticos; RA, HERO, SA y TS encontraron valores para la función objetivo muy similares (Figura 1, arriba), siendo GA claramente inferior y mucho más lento que el resto de los métodos. En el problema 1, el máximo valor absoluto de la función objetivo fue de 0.7453



**Figura 1.** Desarrollo del valor medio de 10 optimizaciones de la función objetivo en función del tiempo cuando los distintos métodos heurísticos son utilizados para solucionar el problema 1 (izquierda) y el problema 2 (derecha)

encontrado por HERO, SA y TS, aunque HERO fue el método más rápido seguido de SA y TS. Por el contrario, en el caso del problema espacial (2) (Fig. 1, abajo), GA fue el método que encontró el mejor valor de la función objetivo (0.7157), mientras que el resto de métodos encontraron soluciones casi idénticas; HERO = 0.7024, SA y TS = 0.7023 y finalmente RA = 0.7022. En el problema 2, HERO volvió a ser el método más rápido mientras que GA fue el más lento.

## DISCUSIÓN

El principal resultado del presente estudio es que los cinco métodos heurísticos utilizados en la resolución de los problemas 1 y 2 encontraron valores bastantes similares para las dos funciones objetivo. Sin embargo, en el problema 1, GA operó significativamente peor que el resto de métodos mientras que en el problema de optimización espacial (2), GA consiguió una mejor solución que el resto de métodos. Este último resultado coincide con el estudio de PUKKALA & KURTTILA (2003), en el que se concluye que los GA son especialmente adecuados para solucionar problemas de planificación forestal de gran complejidad que incluyan objetivos espaciales.

BETTINGER et al. (2002), en un estudio en el que comparaba la efectividad de varios heurísticos en el contexto de diferentes problemas de planificación forestal, clasificaba (en función de los valores de las funciones objetivo obtenidos) en tres clases los heurísticos empleados; muy buenos = SA y TS (este último dependiendo del problema), adecuados = GA, no demasiado adecuados = RA. Nuestro estudio aunque obtiene

algunos resultados similares a los de BETTINGER et al. (2002) (rendimiento de SA y TS en relación a RA) no coincide con respecto a la evaluación general que se hace de GA, que en nuestro caso varía en función del tipo de problema a tratar. Nuestro estudio por lo tanto revela que distintos tipos de problemas de planificación forestal pueden necesitar de distintos métodos o clases de heurísticos. En nuestro estudio, la razón por la que GA produce las mejores soluciones en el problema de optimización espacial, puede deberse a su proceso de búsqueda, el cual es muy diferente al de los otros métodos empleados. GA, al contrario que RA, HERO, SA y TS no basa su proceso de búsqueda en llevar a cabo mejoras locales en un entorno, sino que su estrategia de búsqueda se basa en la recombinación de soluciones, lo cual le permite examinar en cada iteración múltiples cambios respecto a una solución.

En relación al consumo de tiempo de los distintos métodos heurísticos examinados, estos podrían clasificarse en muy rápidos; Hero y RA, rápidos; SA y TS y finalmente lentos; GA. El tiempo empleado por un determinado heurístico juega un papel fundamental en situaciones de planificación interactiva, donde es necesario repetir el proceso de optimización varias veces hasta que el usuario queda satisfecho con la solución encontrada.

Aunque, la función de utilidad fue formulada de manera aditiva, los métodos heurísticos empleados pueden funcionar con distintos tipos de funciones de utilidad (multiplicativas, etc). De todos modos las funciones aditivas han sido las más empleadas en la resolución de problemas forestales (ver PUKKALA & KANGAS, 1993; PUKKALA, 2002). Así mismo, los pesos que acompañan a las

variables objetivo fueron seleccionados por los autores, ya que este era un trabajo teórico que pretendía estudiar el comportamiento de los métodos heurísticos y para el que las preferencias de centros decidores reales no fueron necesarias.

La planificación forestal debe incluir criterios cada vez más diversos y complejos con el fin de asegurar una gestión ecológicamente respetuosa, socialmente aceptable y económicamente viable. Este nuevo paradigma requiere de un mayor uso de objetivos espaciales y de relaciones no lineales en el diseño y formulación de los problemas de planificación forestal para reproducir la realidad lo más verazmente posible. En este contexto, las técnicas clásicas de optimización dejan muchas veces de ser efectivas y métodos heurísticos como los presentados en este estudio son necesarios para obtener soluciones de alta calidad en un tiempo razonable.

## BIBLIOGRAFÍA

- BETTINGER, P.; GRAETZ, D.; BOSTON, K.; SESSIONS, J. & CHUNG, W.; 2002. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica* 36(2): 561-584.
- BORGES, J.; HOGANSON, H. & FALÇAO, A.; 2002. Heuristics in multi-objective forest management. In: T. Pukkala (ed.), *Multi-objective forest planning*: 119-151. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- BOSTON, K. & BETTINGER, P.; 1999. An analysis of Monte Carlo integer programming simulated annealing and tabu search for solving spatial harvest scheduling problems, *For. Sci.* 45: 292-301.
- BOSTON, K. & BETTINGER, P.; 2002. Combining tabu search and genetic algorithm heuristic techniques to solve spatial harvest scheduling problems. *For. Sci.* 48(1): 35-46.
- CROWE, K. & NELSON, J.; 2002. An indirect search algorithm for harvest scheduling under adjacency constraints. *For. Sci.* 49(1): 1-11.
- DOWSLAND, K.A.; 1993. Simulated annealing. In: C.R. Reeves (ed.), *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*: 20-69. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- FALÇAO, A.O. & BORGES, J.G.; 2001. Designing an evolution program for solving integer forest management scheduling models: an application in Portugal. *For. Sci.* 47(2): 158-168.
- GLOVER, F. & LAGUNA, M.; 1993. Tabu search. In: C.R. Reeves (ed.), *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*: 70-150. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- ICONA; 1993. *Segundo Inventario Forestal Nacional (1986-1995) Cataluña: Lleida*. MAPA. Madrid.
- JOHNSON, K.N. & TEDDER, P.L.; 1983. Linear programming vs. binary search in periodic harvest level calculation. *For. Sci.* 29: 569-581.
- KURTILA, M.; PUKKALA, T. & LOIKKANEN, J.; 2002. The performance of alternative spatial objective types in forest planning calculations: a case for flying squirrel and moose. *For. Ecol. Manage.* 166: 245-260.
- NALLE, D.J.; ARTHUR, J.L. & SESSIONS, J.; 2002. Designing compact and contiguous reserve networks with a hybrid heuristic algorithm. *For. Sci.* 48(1): 59-68.
- PALAHÍ, M.; 2002. *Modelling stand development and optimising the management of even-aged Scots pine forests in north-east Spain*. Academic Dissertation. Research notes. Research notes 143. Faculty of Forestry, University of Joensuu. Joensuu.
- PALAHÍ, M., & PUKKALA, T.; 2003. Optimising the management of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Spain based on individual-tree models. *Ann. For. Sci.* 60: 105-114.
- PALAHÍ, M.; PUKKALA, T.; PASCUAL, L. & TRASOBARES, A.; 2003. Examining alternative landscape metrics in ecological forest landscape planning: a case for capercaillie in Catalonia. *Inv. Agr., Sist. Rec. For.* 13(3): 527-538.
- PASCUAL, L.; 2003. *Spatial optimisation in landscape ecological forest planning: a case for capercaillie in Catalonia*. Master thesis. Faculty of Forestry. University of Joensuu. Joensuu.
- PUKKALA, T.; 2002. Introduction to multi-objective forest planning. In: T. Pukkala (ed.), *Multi-objective forest planning*: 1-19. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- PUKKALA, T.; 2003. *MONTE, Calculation and planning program for even-aged and uneven-aged forests of Catalonia*. User's guide. Joensuu.

- PUKKALA, T. & KANGAS, J.; 1993. A heuristic optimization method for forest planning and decision making. *Scand. J. For. Res.* 8: 560-570.
- PUKKALA, T. & KURTTILA, M.; 2003. *Examining the performance of six heuristic optimization techniques in different forest planning problems.* Manuscript.
- REEVES, C.R. (Ed.) 1993. *Modern heuristic techniques for combinatorial problems.* Ed. 1th. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- TRASOBARES, A.; PUKKALA, T. & MIINA, J.; 2004. Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Ann. Sci. For.* 61(1): 9-24