

Planificación Forestal con adyacencias bajo criterios múltiples.

Hernández Huelin, Mónica ^a(m_huelin@uma.es)
Gómez Núñez, Trinidad ^a(trinidad@uma.es)
Molina Luque, Julián^a(julian.molina@uma.es)
León Sánchez, M. Amparo ^b(maleon@mat.upr.edu.cu)
Caballero Fernández, Rafael ^a(rafael.caballero@uma.es)
^a*Departamento de Economía Aplicada(Matemáticas)*
Universidad de Málaga
^b*Departamento de Matemáticas*
Universidad de Pinar del Río (Cuba)

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo multiobjetivo no lineal para la planificación forestal de una plantación productora de madera, considerando aspectos económicos y de protección ambiental. Además, incorporaremos restricciones espaciales que pretenden limitar el área contigua máxima a la que se aplica tala rasa. El modelo desarrollado lo aplicaremos a una plantación cubana perteneciente a la Empresa Forestal Integral Macurije, situada en la provincia de Pinar del Río. Un aspecto a tener en cuenta en las plantaciones cubanas es que presentan una composición desequilibrada por grupos de edad. Por ello, además de los objetivos clásicos en la planificación forestal, se ha de añadir un objetivo que trate de equilibrar la distribución por edades al finalizar el horizonte temporal, para obtener así un flujo constante de madera. La resolución del problema la abordaremos mediante un método metaheurístico denominado SSPMO.

ABSTRACT

In this work, a forest harvesting planning problem is solved via a non linear multiobjective programming model, taking into account economic and environmental protection

aspects. We also incorporate spatial constraints aimed at limiting the maximum adjacent area to which clearcutting can be applied. The model proposed is applied to a timber production plantation in Cuba belonging to the forestry company “*Empresa Forestal Integral Macurije*”, located in the region of Pinar del Río. One factor to be taken into account in Cuban plantations is that the forest has a highly unbalanced age distribution. Therefore, in addition to the classical objectives of forest planning, in this plantation we have the extra goal of rebalancing age distribution by the end of the planning horizon. The problem is solved by applying a metaheuristic method based on Scatter Search called SSPMO.

Palabras claves:

Programación Multiobjetivo; Métodos Metaheurísticos, Planificación Forestal.

Clasificación JEL (Journal Economic Literature): C02; C61; Q23.

Área temática: Aspectos cuantitativos del fenómeno económico (cfe).

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos forestales ha ido evolucionando desde una preocupación inicial, centrada en atender las necesidades industriales, hacia la consecución simultánea de otros fines de variada naturaleza, como son los relativos a la protección medioambiental, los valores recreativos y de demanda social. Ello ha motivado que la toma de decisiones en este contexto haya ido aumentando en complejidad y, por consiguiente, que los modelos decisionales empleados también hayan ido progresando, para poder ser utilizados como soporte o apoyo a dicho proceso de decisión.

Existe una amplia variedad de técnicas multicriterio para abordar la planificación forestal (Mendoza y Martins, 2006; Diaz-Balteiro y Romero, 2008), dependiendo de la problemática concreta a resolver, y de la información disponible. En nuestro caso, nos centraremos en la planificación de la cosecha, esto es, en determinar qué áreas de un bosque o de una plantación han de recibir tratamiento, así como el tipo de tratamiento a realizar, y en qué momento del horizonte temporal. Esta planificación temporal persigue la consecución simultánea de objetivos de diferente naturaleza, respetando al mismo tiempo consideraciones medioambientales, tales como el área

adyacente máxima a la que se le puede aplicar tala rasa. Ello conlleva, por una parte, a que el modelo utilizado sea de carácter multicriterio y, por otra, la utilización de restricciones espaciales, conocidas como adyacencias, que conducen a la utilización de variables enteras.

Hay numerosos trabajos en la literatura que utilizan diferentes aproximaciones multicriterio para abordar el problema de la planificación de la cosecha. Una de las más ampliamente utilizadas es la programación por metas (Kao and Brodie (1979), Field et al. (1980) and Hotvedt (1983)), que es una técnica apropiada cuando se trata de que un conjunto de objetivos en conflicto se acerquen, tanto como sea posible, a unos ciertos umbrales o niveles de aspiración especificados por el decisor, el cual también ha de proporcionar sus preferencias en cuanto al logro de dichos umbrales. En esta línea, resaltamos los trabajos de Díaz-Balteiro y Romero (1998, 2003), que utilizan un modelo de programación multimetas que no precisa información sobre la importancia de las distintas metas perseguidas, obteniendo las soluciones de mejor compromiso validadas en términos de utilidad óptima. Otros autores, como Steuer y Schuler (1978), Bare y Mendoza (1988), y Kazana et al. (2003) han utilizado modelos multibjetivos para la planificación de la cosecha, considerando objetivos relativos a la producción de madera así como otros de carácter recreativo, caza etc. Bajo una aproximación multiobjetivo, la finalidad es la obtención o aproximación del conjunto de soluciones eficientes (frontera de Pareto) del problema. En este trabajo hemos optado por este enfoque, ya que, por un lado, no demanda excesiva información del decisor y, por otro, el análisis de dicho conjunto eficiente permite contrastar el grado de conflictividad (trade-off) entre los distintos objetivos perseguidos, cuánto se ha de renunciar de uno para conseguir más de otro, y con ello adquirir una mayor comprensión de la realidad abordada. De esta forma, se proporciona al decisor de una visión holística del problema, ayudándole a que pueda tomar una decisión más fiable.

Por otra parte, la incorporación de restricciones espaciales en la planificación forestal, para limitar el área adyacente a la que se aplica tala rasa durante un periodo de tiempo, viene siendo una práctica común en el manejo de bosques privados y públicos. Se trata de preservar con ellas la belleza y biodiversidad del entorno forestal (Weintraub y Murray, 2006). Estas consideraciones espaciales vienen motivadas por la división del bosque en unidades básicas de manejo o bloques, que son de superficie variable pero de

semejantes características de las masas, y que forman la superficie elemental del manejo silvícola, de manera que en la modelización se han de utilizar variables binarias que indican si una unidad en cuestión es objeto de un tratamiento específico o no, como puede ser la tala rasa. En la literatura podemos distinguir dos aproximaciones diferentes para tratar las adyacencias. En una, conocida como modelo URM (Unit Restriction Model), dos o más bloques vecinos no pueden ser talados simultáneamente. Bajo la otra aproximación, conocida por ARM (Area Restriction Model), el área contigua de tala rasa no puede superar un umbral (maximum opening size). Es decir, dos bloques adyacentes podrían ser talados simultáneamente siempre que no superen un cierto área máxima (Murray,1999). No obstante, la mayoría de los modelos existentes son de programación lineal en variable entera con una sola función objetivo a optimizar, siendo escasos los que consideran más de un objetivo en conflicto, quizás porque su resolución computacional es más costosa para problemas grandes. Entre ellos cabe destacar los de Roise (1990) y Snyder y Revelle (1997), que plantean problemas multiobjetivos cuya resolución es abordada mediante el método de la ponderación, y las adyacencias responden al modelo URM. Por otro lado, Tóth et al. (2006) elaboran un modelo bi-criterio con restricciones de adyacencia del tipo ARM que luego extienden en Tóth y McDill (2008) a tres objetivos. Sin embargo, como señalan los propios autores, los procedimientos exactos de resolución que utilizan pueden ser computacionalmente costosos para problemas grandes. En el trabajo que aquí presentamos incorporaremos restricciones de adyacencia bajo el enfoque ARM, que, como queda explícito en la literatura al efecto, se trata de un modelo más potente y complejo que el URM (Murray y Weintraub (2002), McDill et al. (2002), Goycoolea et al. (2005), Weintraub y Murray (2006)).

Tradicionalmente, se dice que los sistemas forestales cumplen un triple papel: de producción, protección y recreo. En este trabajo, utilizamos la programación multiobjetivo para resolver un problema de gestión forestal donde nos ocuparemos de dos de los tres aspectos del bosque mencionados anteriormente. Por una parte, nos centramos en el aspecto económico de bosques productores de madera y, por otra, consideraremos aspectos de protección ambiental. En relación con estos últimos hemos de señalar el importante papel que juegan los bosques como posibles reguladores del clima, debido a que los árboles, en su metabolismo, consumen mucho más dióxido de

carbono del que emiten y pueden así contrarrestar las altas emisiones de este gas con efecto invernadero (Bateman y Lovett, 2000). En este sentido, el Protocolo de Kyoto supuso un avance significativo y estableció el principio de que se podrían utilizar las actividades forestales para compensar las emisiones industriales de carbono (Plantinga et al., 1999). En ello se insistió en las sucesivas reuniones de las Partes del Protocolo de Kyoto (Montreal (diciembre 2005), Nairobi (noviembre de 2006), Bali (diciembre 2007), Copenhague (diciembre 2009), México (diciembre 2010)). La proporción de carbono en los árboles depende de la edad y es una función del índice de crecimiento. Absorben gran cantidad de este gas cuando son jóvenes y crecen rápidamente. A medida que se acercan a la madurez y los índices de crecimiento disminuyen, también la absorción neta de carbono disminuye. Por otro lado, al talarlos, se libera un porcentaje del carbono almacenado a la atmósfera. Algunos trabajos han incorporado la captura de carbono como un objetivo adicional a tener en cuenta en la planificación de la cosecha. Hoen y Solberg (1994) presentan un modelo bicriterio que les permite analizar el trade-off entre el valor actualizado neto del plan de cosecha y el valor presente de las capturas de carbono en el horizonte temporal. Por otra parte, Díaz-Balteiro y Romero (2003) desarrollan distintos modelos de programación por metas que contienen una medida operativa de la captura de carbono en conjunción con otros criterios de naturaleza económica y silvicultural. En esta línea, partiendo de la formalización realizada por estos autores de la captura de carbono, hemos incorporado en nuestro modelo un objetivo de maximización de la cantidad almacenada de este gas en la plantación a lo largo del periodo de planificación.

El modelo propuesto lo aplicaremos a una plantación cubana con fines productivos. Un aspecto a tener en cuenta de las plantaciones cubanas es que presentan una composición desequilibrada por grupos de edad. Por ello, además de los objetivos clásicos en la planificación forestal, en estas plantaciones se ha de añadir un objetivo que trate de equilibrar la distribución por edades al finalizar el horizonte temporal y así obtener un flujo constante de madera. Dicho objetivo se ha planteado en este trabajo siguiendo la formulación fraccional de Gómez et al. (2006) donde se modeliza el deseo de equilibrio en términos de la diferencia relativa entre los grupos de edad. Esto quiere decir que nuestro modelo no se corresponde con una formulación lineal, lo que hace aún más compleja su resolución. Si tenemos en cuenta además su carácter multiobjetivo y

las restricciones espaciales del tipo ARM, nos encontramos ante un problema sumamente complejo, cuya resolución es necesaria abordarla mediante procedimientos metaheurísticos. Este tipo de métodos están siendo utilizados cada vez con más frecuencia en problemas de planificación forestal cuando las actuales formulaciones de métodos exactos no son lo suficientemente potentes como para resolver problemas como el que aquí se presenta (Pukkala y Heinonen (2006)). En la literatura han sido utilizados diferentes métodos tales como el temple simulado, tabú search, algoritmos genéticos, etc. (Borges et al. (2002), Falcao y Borges (2002), Caro et al. (2003), Liu et al. (2006), entre otros). El algoritmo metaheurístico empleado para la resolución de nuestro problema ha sido una adaptación del método evolutivo SSPMO (Scatter Search Procedure for Multiobjective Optimization, Molina et al. (2007)).

La estructura del trabajo será como sigue. En la siguiente sección estableceremos el modelo propuesto en su forma teórica y la técnica metaheurística empleada para la resolución del mismo. La sección 3 la dedicamos a la aplicación al caso cubano y la discusión de los resultados obtenidos. Concluiremos el trabajo con la sección de conclusiones y referencias bibliográficas.

2. FORMULACIÓN DEL MODELO Y RESOLUCIÓN.

En esta sección desarrollamos un modelo para planificar la cosecha anual de una plantación a lo largo de un horizonte temporal de T años. Supondremos que ésta se encuentra dividida en diferentes unidades (bloques) de acuerdo, por ejemplo, a características físicas: pendientes, altitud, accesibilidad, etc. Consideraremos que hay R unidades homogéneas o bloques ($r = 1, 2, \dots, R$). Cada una está caracterizada por tres magnitudes: su superficie $S(r)$, medida en hectáreas; su edad en t ($t = 1, 2, \dots, T$), denotada por $E(r, t)$, expresada en años, siendo $E(r, 0)$ la edad inicial de dicha unidad y, finalmente, su índice de sitio, $IS(r)$, con $IS(r) = 1, 2, \dots, H$, de acuerdo con su rendimiento. Cabe resaltar que consideraremos que todo lo que se tala se vuelve a repoblar y, por tanto, la superficie de cada unidad o bloque se mantiene constante a lo largo de toda la planificación, al igual que el índice de sitio correspondiente.

Por otra parte, las unidades están agrupadas en función de las adyacencias de forma que tenemos K grupos de adyacencias, C_1, C_2, \dots, C_K , donde cada C_i está compuesto por dos o mas bloques contiguos. Estos grupos están calculados de manera que la superficie de las unidades que están en el mismo grupo C_i supera el umbral permitido S^* denominado maximum opening size (Murray y Weintraub (2002)). Así pues las unidades pertenecientes a un mismo grupo de adyacencias no se pueden talar simultáneamente en el mismo año. Además, se tratarán las adyacencias teniendo en cuenta los llamados *green-up requirements* que impiden que se talen bloques pertenecientes a un mismo conjunto de adyacencias hasta que hayan transcurrido un número g de años o periodos de planificación.

Con el objetivo de planificar la cosecha de dicha plantación, se consideran relevantes los siguientes objetivos: *regular el bosque*, es decir, que la superficie por grupos de edad al finalizar la planificación sea bastante similar, para que ello permita un flujo de cosecha uniforme; *minimizar la superficie de árboles con edad superior a la edad de rotación (N^*)*, *maximizar el valor actualizado neto de la plantación* y, por último, *maximizar la captura de carbono a lo largo del horizonte temporal*, el cual supondremos que es de T años, es decir, $t = 1, 2, \dots, T$.

La variable de decisión del modelo va a indicar el tratamiento (j) a aplicar a cada unidad (bloque r), cada año (t) y la denotaremos por x_{rjt} , ($r = 1, 2, \dots, R$; $j = 1, 2, \dots, J$; $t = 1, 2, \dots, T$) de manera que:

$$x_{rjt} = \begin{cases} 1 & \text{si al bloque } r \text{ se le aplica tratamiento } j \text{ en el año } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Hemos de tener en cuenta que el tipo de tratamiento a aplicar en cada instante, a cada bloque, depende de su edad, lo cual implica que el subíndice j depende de $E(r, t)$ y denotaremos por $A(E(r, t))$ el conjunto de tratamientos asociados a la edad $E(r, t)$, es decir:

$$A(E(r, t)) = \{j / j \text{ es el tratamiento correspondiente a la edad } E(r, t)\}$$

Las posibles actuaciones a realizar se encuentran limitadas por una serie de restricciones, de diversa índole, que pasamos a comentar.

Inicialmente, como hemos comentado previamente, el tipo de tratamiento depende de la edad, y ésta va cambiando a lo largo del horizonte temporal, bien por la propia evolución de la masa forestal, o por la actuación sobre ella. Así, la edad de cada unidad o bien incrementa en uno con respecto a la edad del año previo, o bien, si dicha unidad ha sido talada (tratamiento J), pasa a tener edad 1. Es decir:

$$E(r, t) = (E(r, t - 1) + 1)(1 - x_{rJt}) + x_{rJt} \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

Una unidad talada no puede volver a serlo hasta que hayan pasado η años:

$$\sum_{s=t}^{t+\eta} x_{rJs} \leq 1 \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad t = 1, 2, \dots, T - \eta \quad (2)$$

No se pueden talar simultáneamente bloques de un mismo conjunto de adyacencias hasta que hayan pasado g años (donde g es constante):

$$\sum_{r \in Ck} \sum_{s=t}^{t+g-1} x_{rJs} \leq |C_k| - 1 \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T - g \quad (3)$$

Restricciones técnicas relativas a los tratamientos:

$$x_{rjt} = 0 \text{ si } j \notin A(E(r, t)) \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

En un mismo año no se pueden aplicar dos tratamientos distintos a la misma unidad:

$$\sum_{j \in A(E(r, t))} x_{rjt} \leq 1 \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

También hay ciertas restricciones de sostenibilidad. Por una parte, no se permite talar árboles jóvenes, con edad inferior a n^* :

$$\sum_{t=1}^T \sum_{r / E(r, t-1) < n^*} (S(r) x_{rJt}) = 0 \quad (6)$$

Por otra parte, el área al que se le aplica tala rasa cada año no debe sobrepasar un umbral que asegura la renovación de la masa forestal, conocido como la superficie equilibrio (Se) y que viene dado por el área total de la plantación dividida por la edad de rotación. Ello conlleva que:

$$\sum_{r=1}^R S(r)x_{rJt} \leq Se \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

Además, se trata de mantener los niveles de extracción en el límite de volumen que se puede lograr sin riesgos de degradación, tratando de que no se sobrepase. Así, si v_{rjt} representa el volumen obtenido al aplicar el tratamiento j a la unidad de manejo r en el año t , y V^t la posibilidad volumen cosechable en el año t , imponemos la siguiente restricción:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} v_{rjt} x_{rjt} \leq V^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

Por último, se han planteado restricciones que controlan ciertos valores de importancia en el modelo. Así se impone una cota inferior a la superficie a la que se aplica tala rasa:

$$\sum_{r=1}^R S(r)x_{rJt} \geq \tau Se \quad t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (9)$$

En cuanto a los objetivos perseguidos en la planificación, se ha comentado previamente que uno de ellos es conseguir una plantación lo más regulada posible, es decir, que la distribución de la superficie, por edades, sea homogénea al finalizar la planificación. Con ello se trata de asegurar un flujo uniforme del suministro maderero.

Para ello, haremos uso de la propuesta fraccional de Gómez et al. (2006) donde se modeliza este deseo mediante un cociente que muestra la diferencia relativa entre el número de hectáreas de árboles en un primer grupo de edad y en un último grupo de edad. Para adaptar dicha modelización al caso que nos concierne, siendo la

planificación anual, vamos a considerar como primera categoría de edad a las unidades de manejo con edades comprendidas entre 1 y m años (siendo m una constante divisora de N^*), la segunda categoría la conforman aquellas unidades con edades entre $m+1$ y $2m$ años, y en general, la categoría i está formada por las unidades con edades entre $(i-1)m-1$ y im . Hemos de tener en cuenta que habrá I categorías, con $I = N^*/m$, de manera que la última categoría recoge las unidades con edad mayor que $N^* - m$ años. Así, la superficie total en la categoría de edad i al final del año t (S_i^t) viene dada por:

$$S_i^t = \sum_{r/E(r,t)=(i-1)m+1}^{E(r,t)=im} S(r) \quad i = 1, 2, \dots, I-1$$

$$S_I^t = \sum_{r/E(r,t)>N^*-m} S(r)$$

Formemos el ratio $\frac{S_1^T}{S_I^T}$. Teniendo en cuenta las restricciones (7) y (6) (con

$n^* = I-1$) dicho ratio es inferior o igual a 1. Si suponemos que $T \geq N^*$ podemos generalizar el resultado que aparece en Gómez et al. (2006), para el contexto que nos ocupa, y afirmar que si dicho ratio vale 1 entonces es posible conseguir una distribución equilibrada por categorías de edad al final del horizonte de planificación. Con lo cual un primer objetivo será

$$Max \quad f^1 = \frac{S_1^T}{S_I^T} \tag{10}$$

Otro objetivo es reducir la superficie ocupada por árboles con edad superior a la edad de rotación, o de otra forma, maximizar la tala rasa para rodales que superen dicha edad:

$$Max \quad f^2 = \sum_{t=1}^T \sum_{r/E(r,t)>N^*} (S(r)x_{rJt}) \tag{11}$$

Por otro lado, tenemos el objetivo económico de maximizar el valor actualizado neto a lo largo del horizonte de planificación:

$$\text{Max } f^3 = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} \text{VAN}_{rjt} x_{rjt} \quad (12)$$

Por último, el carbono almacenado en los árboles a lo largo del periodo de planificación ha de ser lo más elevado posible. El carbono en cualquier instante consideraremos que viene dado por la diferencia entre el fijado por el crecimiento de la plantación y la cosecha, y el que se desprende como consecuencia de dicha cosecha. Supondremos que el carbono fijado es proporcional al volumen, y a la tasa de conversión del dióxido de carbono atmosférico en biomasa la denotaremos por γ (ton. de carbono/m³ de madera), la cual depende de la especie considerada. Por otra parte, denotaremos por β_{rjt} el porcentaje del dióxido de carbono fijado en la biomasa que se desprende a la atmósfera en el momento de la cosecha. Este porcentaje lo supondremos constante, pero depende del uso que se haga de la madera obtenida y del tipo de tratamiento. En consecuencia, el objetivo relativo al carbono sería:

$$\text{Max } f^4 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{r=1}^R \gamma (v_{rJt} - v_{rJ(t-1)}) + \gamma \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J x_{rjt} v_{rjt} (1 - \beta_{rjt}) \right) \quad (13)$$

Por tanto, nuestro modelo viene dado por:

$$\begin{aligned} & \text{Opt } (f^1, \dots, f^4) \\ & \text{Sujeto a (1)-(9)} \end{aligned} \quad (14)$$

$$x_{rjt} \in \{0,1\} \quad r = 1, \dots, R; j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T$$

Se trata de un problema de Programación Binaria No-Lineal Multiobjetivo, cuya complejidad condiciona sumamente su resolución. Así, un método exacto en este caso resulta inviable, en primer lugar por el carácter no-lineal binario del problema y en segundo por la dimensión del mismo, donde el número de variables asciende a tantas como número de bloques por número de períodos de planificación y por número de tratamientos. Por estas razones, tal y como se señala en la introducción, hemos acudido

a los métodos metaheurísticos que se han mostrado sumamente eficientes para la resolución de este tipo de problemas en la literatura.

Los métodos evolutivos dominan la investigación en el campo de metaheurísticos para la programación multiobjetivo, tal y como puede observarse por ejemplo en Coello et al. (2002). Así, hemos adaptado el método evolutivo SSPMO (Scatter Search Procedure for Multiobjective Optimization, Molina et al., 2007) basado en Scatter Search (SS) (Glover et al. 2000) para la resolución de nuestro problema de planificación forestal. Este método ha demostrado una capacidad de resolución muy competitiva sobre un amplio conjunto de problemas test, tal y como se puede observar en Molina et al. (2007).

3. APLICACIÓN AL CONTEXTO CUBANO.

El modelo formalizado en el epígrafe anterior lo hemos aplicado a una plantación cubana formada por 3.347,7 ha. de *Pinus Caribaea*, perteneciente a la Empresa Forestal Integral (E.F.I) “Macurije” ubicada en la provincia de Pinar del Río. La superficie de esta plantación es un 30,5% de la unidad de manejo “Minadora”, a la cual pertenece, dentro de la E.F.I “Macurije”. Minadora representa un 12% de la superficie total de la empresa y está distribuida en 35 lotes que varían en cuanto al tamaño. Todos los lotes están categorizados según lo establecido en la Ley Forestal del país, por lo que los mismos tienen como objetivo fundamental la producción de madera. Los lotes se componen de secciones más pequeñas llamadas bloques, que son de superficie variable pero de semejantes características de las masas. Los elementos que se toman en cuenta para diferenciar los bloques dentro del lote son, entre otros, la edad de los árboles, los diámetros medios, la altura media, el área basal, la densidad y composición del bosque. Según Bobko y Aldana (1981) los bloques forman la superficie elemental del manejo silvícola. Esto se traduce en que cada bloque representa una unidad casi homogénea en las cuestiones de comportamiento, tipología y mediciones dasométricas. La superficie objeto de estudio se compone de 305 bloques cuya función principal es la producción de madera de pequeñas dimensiones usada para la industria tabacalera del país.

Esos 305 bloques se encuentran distribuidos en 4 índices de sitio ($H = 4$) con edades que varían de 3 a 41 años. La edad de rotación para la plantación está fijada en 30 años ($N^* = 30$) y coincide con el horizonte de planificación, $T = 30$. En la Tabla 1 se muestra la distribución inicial de la plantación.

<i>Area (ha)</i>	<i>Site index</i>				
<i>Years</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>Total</i>
0-5	9,1	0	0	54,2	63,3
6-10	55,7	54,8	72,2	0	182,7
11-15	4,6	21,4	0	0	26
16-20	0	30,6	12,0	0	42,6
21-25	14,4	412,9	142	12,2	581,5
> 25	93,9	1.495,6	676,5	185,6	2.451,6
TOTAL	177,7	2.015,3	902,7	252,0	3.347,7

Tabla 1. Situación Inicial de la plantación por edad e índice de sitio.

La suma por filas muestra las hectáreas de la plantación en cada clase de edad en la situación de partida, mientras que la suma por columnas refleja las hectáreas disponibles por índice de sitio, lo cual no cambiará a lo largo del horizonte temporal. Resulta evidente que se trata de una plantación con una distribución bastante desequilibrada por grupos de edad, como se muestra en el gráfico 1. El número de hectáreas con árboles de edad superior a 25 años representa el 73,23% de la superficie total de la plantación, y la diferencia relativa entre la superficie ocupada por unidades básicas con edad inferior a 5 años y la de aquellas con edad superior a 25 es del 2,58%.

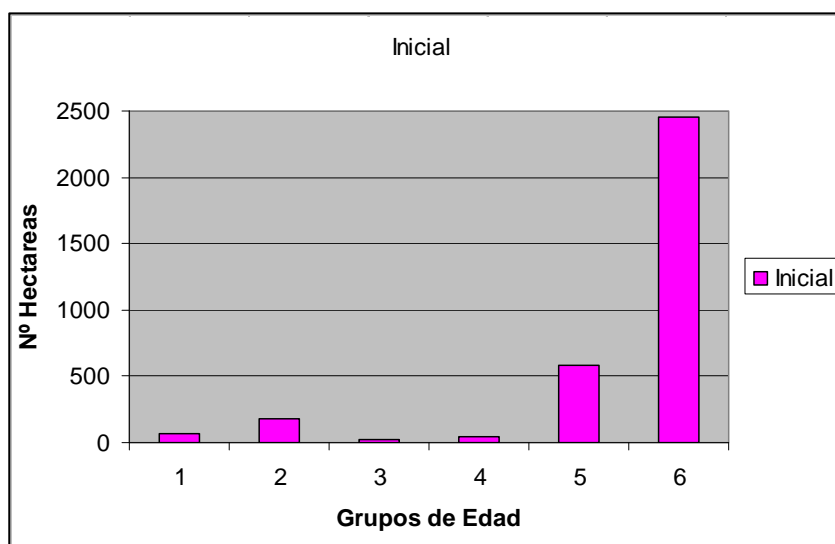


Gráfico 1. Área cubierta por cada clase de edad en la situación inicial

Las unidades básicas de manejo están agrupadas en 103 conjuntos de adyacencias. Además de poder aplicar tala rasa (tratamiento 4) a todos los grupos de edad, hay tratamientos específicos según la edad. Así, los árboles con edades comprendidas entre 11 y 15 años pueden recibir raleo 1 ($j=1$), los que tienen entre 16 y 25 años de edad, raleo 2 ($j=2$) y, finalmente, los que tienen más de 25 años, raleo 3 ($j=3$). Así, para esta aplicación hay un total de 36.600 variables binarias de decisión.

En las restricciones, los valores de los parámetros fueron establecidos por el centro decisor. Así, $\eta = 20$ años en la expresión (2), $g = 1$ año en (3), se consideran árboles jóvenes los que tienen una edad inferior a 20 años, es decir, $n^* = 20$ en (6). El área de equilibrio, Se , en la restricción (7) viene dada por:

$$Se = \frac{1}{30} 3.347,7 = 111,6 \text{ ha.} \quad t = 1, 2, \dots, 30$$

y al objeto de garantizar la regeneración de los árboles, el valor del parámetro τ es 0,75 en (9). El volumen anual cosechable en la expresión (8) fue fijado en 34.869 m^3 , que representa el máximo volumen de madera que puede ser obtenido sin riesgo de degradación de la plantación.

En relación con los objetivos, los valores de los parámetros para esta situación real fueron: en f^1 , la primera clase de edad comprende las unidades básicas que tienen entre 1 y 5 años ($m = 5$), y la última clase de edad está formada por unidades con más de 25 años. En f^2 , la edad de rotación es $N^* = 30$ años. Finalmente, en f^4 , la tasa de conversión del dióxido de carbono atmosférico en biomasa es del 50%, es decir $\gamma = 0,5$.

En consecuencia, este problema real tiene, aparte de 36.600 variables binarias, cuatro funciones objetivo y alrededor de 20.000 restricciones. Como hemos descrito en el epígrafe anterior, el problema ha sido resuelto por el método metaheurístico evolutivo SSPMO utilizando un procesador Pentium IV (3.2 GHz) con un tiempo de ejecución de 233.843 segundos.

La resolución del problema proporciona un conjunto de 72 planes eficientes de actuación sobre la plantación a lo largo de los 30 años. Para analizar este conjunto eficiente, calculamos la matriz de pagos que se muestra en la Tabla 2. Los elementos de la diagonal principal representan los valores óptimos de cada uno de los objetivos, es decir, el punto ideal. Como se puede observar en dicha tabla, el rango de variabilidad de cada objetivo sobre la frontera eficiente no es muy significativo. Cabe resaltar el trade-off entre el objetivo económico y el de captura de carbono. De hecho, la máxima captura de carbono se corresponde con la solución en la que el VAN es lo más pequeño posible, y la solución correspondiente al máximo VAN tiene el valor de carbono más pequeño. Por otra parte, la solución que maximiza la acumulación de carbono es la misma que la que maximiza la tala rasa de árboles con edad superior a la edad de rotación. Por último, la solución en la que el nivel de equilibrio es más pequeño tiene el VAN más alto.

	f^1	f^2 (has.)	f^3 (pesos)	f^4 (tons.)
f^1	0,804	2.827,6	3.071.120	262.985
f^2	0,791	2.876,1	3.045.330	281.462
f^3	0,788	2.713,5	3.093.990	251.875
f_4	0,791	2.876,1	3.045.330	281.462
<i>range</i>	0,016	162,6	48.660	29.587

Tabla 2. Matriz de Pagos.

Analizada la información proporcionada por la Tabla 2, el decisor seleccionó la solución que optimizaba el primer objetivo, es decir en la que se consigue un equilibrio mayor entre las clases de edad de la plantación y, además, alcanza valores intermedios para el resto de los objetivos. Con ello y el proceso de resolución concluyó.

En dicha solución, la diferencia relativa entre el área cubierta por unidades básicas en el primer grupo de edad y en el último incrementa cada año desde el 2,58%

al 84,1%. Aunque no se consigue un bosque completamente regulado, la distribución por edades al final del horizonte temporal ha mejorado considerablemente con respecto a la situación inicial (ver Gráficos 1 y 2). En la situación final, el número de hectáreas ocupadas por árboles mayores a 25 años es del 21,44% del total de la superficie de la plantación, en comparación con el 73,23% de la situación inicial.

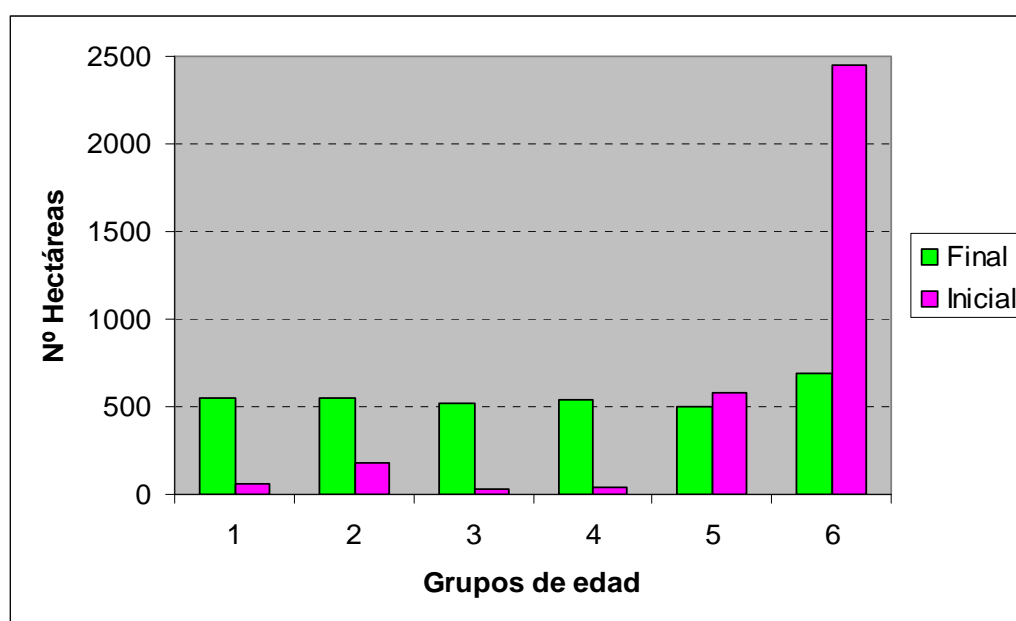


Gráfico 2. Área cubierta por cada clase de edad en la situación final e inicial

En la solución elegida, en la situación final, hay 209,1 hectáreas ocupadas por unidades básicas con árboles de más de 30 años, que representa el 6,24% de la superficie total, comparada con el 66% en la situación inicial. Con respecto a los otros objetivos, el VAN obtenido es de 3.079.622,7 pesos, el cual no es el mejor ni el peor valor posible. Finalmente, las toneladas de carbono capturadas serían de 283.511. Como se puede ver del análisis de la información contenida en la matriz de pagos (Tabla 2), no es posible mejorar estos dos valores de una manera significativa teniendo en cuenta las restricciones y la situación inicial de la plantación.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un modelo para la planificación forestal que incluye objetivos de diferente naturaleza y restricciones técnicas, tácticas y de sostenibilidad. La finalidad era optimizar los objetivos sin degradar el ecosistema: obtener una distribución lo más equilibrada posible de la plantación por grupos de edad de las masas, sin tener que sacrificar árboles jóvenes en el proceso; reducir las unidades de manejo con edad superior a la edad de rotación, maximizar el valor actualizado neto de la producción de madera y el carbono almacenado por la plantación a lo largo del horizonte temporal, teniendo en cuenta, además de las restricciones técnicas y de sostenibilidad, que no es posible talar unidades adyacentes que sobrepasen el umbral máximo establecido. El modelo ha sido planteado siguiendo un enfoque multiobjetivo con la intención de generar el conjunto de planes eficientes para el problema de gestión forestal. Este conjunto eficiente ayuda al decisor o decisores a alcanzar una mayor comprensión del problema, proporcionando información sobre las tasas de intercambio y el grado de incompatibilidad entre los objetivos perseguidos. Con ello se facilita el proceso de decisión final sobre la actuación a llevar cabo.

El modelo propuesto es un problema complejo debido a sus características: es multiobjetivo, no lineal y con variables binarias. Por tanto, para su resolución hemos optado por un método metaheurístico denominado SSPMO, ya que ha demostrado ser altamente competitivo para resolver problemas multiobjetivos.

La aplicación del modelo a una plantación real localizada en la provincia de Pinar del Río (Cuba) pone de manifiesto su utilidad. Se ha obtenido un conjunto de 72 soluciones eficientes. En ninguna de ellas se consigue una distribución equilibrada por grupos de edad, pero sí que es posible una mejora importante con respecto a la situación inicial. A partir de la matriz de pagos del problema, se puede comprobar el grado de conflicto existente entre los objetivos. En nuestro caso se observa que el rango de variabilidad de las funciones objetivo, a lo largo de la frontera eficiente, no es amplio, quizás motivado porque las restricciones de adyacencia constriñen mucho el conjunto de posibles actuaciones. Por otro lado, cabe resaltar que hay un claro trade-off entre el objetivo económico (VAN) y el de Carbono, lo cual era de esperar, puesto que la tala de

árboles muy viejos no añade mucho valor económico, mientras que desde el punto de vista del objetivo del carbono interesa alargar el momento de la tala rasa.

Finalmente señalar que el modelo propuesto puede ser aplicado en otros contextos forestales, y que estamos trabajando en la simulación de distintos tipos de bosques al objeto de seguir contrastando el funcionamiento de nuestra formalización bajo otros condicionantes.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARE, B., MENDOZA, G. (1988). “Multiple objective forest 1, management planning: An illustration”. *European Journal of Operational Research*, 34:, pp. 44-55.
- BATEMAN, I. J., LOVETT, A.A. (2000). “Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales”. *Journal of Environmental Management*, 60, pp. 301-323.
- BOBKO, A. ALDANA, E. (1981). “Ordenación de Montes”. Centro Universitario de Pinar del Río. Cuba.
- BORGES, J.G., HOGANSON, H.M., FALCÃO, A.O. (2002). “Heuristics in multi-objective forest planning”. In Pukkala, T. (ed) *Multi-objective forest planning*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- CARO, F., CONSTANTINO, M., MARTINS, I., WEINTRAUB, A. (2003). “A 2-opt tabu search procedure for the multiperiod forest harvesting problem with adjacency, green-up, old growth, and even flow constraints”. *Forest Sci.*, 49, pp. 738-751.
- COELLO, C., VAN VELDHUIZEN, D. A., LAMONT, G. B. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Second Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston.

- DÍAZ-BALTEIRO, L., ROMERO, C. (1998). "Modelling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: an application in Spain". *Forest Sci.*, 44, pp. 47-57.
- DÍAZ-BALTEIRO, L., ROMERO, C. (2003). "Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach". *Forest Ecology and Management*, 174, pp. 447-457.
- DIAZ-BALTEIRO, L., ROMERO, C (2008). "Making forestry decisions with multiple criteria: a review and an assessment. *Forest Ecol Manage*, 225, pp. 3222-3241.
- FALCÃO, A., BORGES, J. (2002). "Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models". *Forest Sci.*, 48, pp. 608-621.
- FIELD, R., DRESS, P. E., FORTSON, J. C. (1980). "Complementary Linear and Goal Programming procedures for timber harvest scheduling". *Forest Sci.*, 26, pp. 121-133.
- GLOVER, F., LAGUNA, M. AND MARTÍ, R. (2000). "Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking". *Control and Cybernetics*, 39, pp. 653-684.
- GOYCOOLEA, M., MURRAY, A.T., BARAHONA, F., EPSTEIN, R., WEINTRAUB, A. (2005) "Harvest scheduling subject to maximum area restrictions: exploring exact approaches". *Oper. Res.*, 53, pp. 490-500.
- GÓMEZ, T., HERNÁNDEZ, M., LEÓN, M.A., CABALLERO, R. (2006). "A Forest Planning Problem Solved via a Linear Fraccional Goal Programming Model". *Forest Ecology and management*, 227, pp.79-88.
- HOEN, H.F., y SOLBERG, B. (1994). Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science*, 40, pp. 429-451.
- HOTVEDT, J.E. (1983). "Application of linear goal programming to forest harvest scheduling". *Southern Journal of Agricultural Economics*, 15, pp. 103-108.

- KAO, C., BRODIE, J. D. (1979). "Goal programming for reconciling economic, even flow, and regulation objectives in forest harvest scheduling". *Canadian Journal of Forest Research*, 9, pp. 525-531.
- KAZANA, V., FAWCETT, R.H., MUTCH, W.E.S., (2003). "A decision support modelling framework for multiple use forest management: The Queen Elizabeth Forest case study in Scotland". *European Journal of Operational Research*, 148, pp. 102-115.
- LIU, G., HAN, S., ZHAO, X., NELSON, J.D., WANG, H., WANG, W. (2006). "Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning". *Ecol Model.*, 194, pp. 421-428.
- MCDILL, M.E., REBAIN, S.A., BRAZE, J. (2002) "Harvest scheduling with area-based adjacency constraints". *Forest Sci.*, 48, pp. 631-642.
- MENDOZA, G.A. y MARTINS, H. (2006). "Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modelling paradigms". *Forest Ecology and Management*, 230, pp. 1-22.
- MOLINA, J., LAGUNA, M., MARTI, R., CABALLERO, R. (2007). "SSPMO: A scatter tabu search procedure for non-linear multiobjective optimization", *JOC.*, 19, 1, pp. 91-100.
- MURRAY, A.T. (1999). "Spatial restrictions in harvest scheduling". *Forest Sci.*, 45, pp. 1-8
- MURRAY, A.T., WEINTRAUB, A. (2002). "Scale and unit specification influences in harvest scheduling with maximum area restrictions". *Forest Sci.*, 48, pp. 779-789.
- PLATINGA, A. J., MAULDIN, T., MILLER, J. (1999). " An econometric analysis of the costs of sequestering carbon in forest".
- PUKKALA, T., HEINONEN, T. (2006). "Optimizing heuristic search in forest planning". *Nonlinear Anal.*, 7, pp. 1284-1297.
- ROISE, J.P. (1990). "Multicriteria nonlinear programming for optimal spatial allocation of stands. *Forest Sci.*, 36, pp. 487-501.

- SNYDER, S., REVELLE, C. (1997). “ Multiobjective grid packing model: an application in forest management”. *Location Science*, 5, pp. 165-180.
- STEUER, R. E., SCHULER, A. T. (1978). “A interactive multiple objective linear programming approach to a problem in forest management”. *Operations Research*, 26, pp. 254-269.
- TÓTH, S.F., MCDILL, M.E., REBAIN, S. (2006). “ Finding the efficient frontier of a bi-criteria, spatially explicit, harvest scheduling problem”. *Forest Sci.*, 52, pp. 93-107.
- TÓTH, S.F., MCDILL, M.E. (2008). “ Finding efficient harvest schedules under three conflicting objectives”. *Forest Sci.*, 55, pp. 117-131.
- WEINTRAUB, A., MURRAY, A.T. (2006). “Review of combinatorial problems induced by spatial forest harvesting planning”. *Discret Appl Math*, 154, pp. 867-879.