

DETERMINACIÓN DEL TURNO ÓPTIMO DE APROVECHAMIENTO DE LA ESPECIE “LYSILOMA LATISSILIQUEUM BENTH” CONSIDERANDO MÚLTIPLES CRITERIOS

María Amparo León, Mercedes Almeida

Departamento de Matemática.

Universidad de Pinar del Río. Cuba

e-mail: (maleon@mat.upr.edu.cu; yanes@af.mat.upr.edu.cu)

Rafael Caballero, Julián Molina, Trinidad Gómez

Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas)

Universidad de Málaga

e-mail: (rafael.caballero@uma.es; trinidad@uma.es; julian.molina@uma.es)

Resumen

El soplillo (*Lysiloma latissiliquum Benth*) es de gran importancia económica tanto por las características y calidad de sus maderas como por la amplia gama de surtidos que ofrecen, actúa como regulador hídrico, comprobándose su capacidad para almacenar Dióxido de Carbono. El trabajo que se presenta aborda la temática de la determinación del turno óptimo de aprovechamiento de la especie considerando criterios económicos y de máxima captura de carbono. Dado el carácter No-Lineal del problema y el hecho de que uno de los dos objetivos del mismo es una función definida a trozos, su resolución se ha realizado utilizando un metaheurístico para Programación Multiobjetivo basado en una búsqueda Tabú.

Palabras clave: Turno forestal, Captura de carbono, Programación Compromiso.

1. Introducción.

Los sistemas forestales desempeñan múltiples funciones. Tradicionalmente se dice que los montes cumplen un triple papel: de producción, protección y recreo. En este trabajo nos centraremos en dos de ellos. Por una parte, como productores de madera y, por otra, como posibles reguladores del clima al actuar como sumideros de carbono.

La posibilidad de un cambio climático mundial, como consecuencia de las emisiones antropogénicas de gases con efecto invernadero (GEI), es motivo de preocupación de la comunidad científica internacional desde hace varios años. Un cambio de esta naturaleza puede tener efecto sobre el comportamiento de fenómenos naturales asociados con el clima, esto es, incremento de la temperatura, cambio en el régimen de lluvias, vientos, corrientes y mareas e incremento del nivel del mar.

La proporción de absorción de carbono de los árboles y de los bosques es una función del índice de crecimiento de la edad. Los árboles absorben gran cantidad de carbono cuando son jóvenes y crecen rápidamente. A medida que los rodales se acercan a la madurez y los índices de crecimiento disminuyen, también la absorción neta de carbono disminuye. Cuando se talan (o destruyen) los bosques, parte del carbono almacenado en los árboles se libera a la atmósfera en forma de dióxido de carbono, uno de los principales gases del efecto invernadero. Esta liberación depende del uso al que se destine la madera obtenida y será más rápida si la madera se quema.

Los bosques tropicales abiertos, matorrales y bosques relativamente secos, y cerrados (el 90 por ciento de los cuales son húmedos) contienen cerca de la mitad de las reservas terrestres de carbono. Los bosques cerrados constituyen el almacén de carbono de mayor tamaño. En 1980, los bosques cerrados tropicales húmedos y secos ocupaban una superficie de cerca de 1.200 millones de hectáreas.

Comprobada la importancia que tienen los vegetales para atrapar carbono atmosférico y transformarlo en materia vegetal (biomasa), se comenzó a considerar que las plantaciones forestales son excelentes sumideros de carbono atmosférico,

siendo por ello consideradas para lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas.

En este sentido, el protocolo de Kyoto, el último avance alcanzado en relación con el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre los Cambios Climáticos, estableció el principio de que se podrían utilizar las actividades forestales para compensar las emisiones industriales de carbono. La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) (adoptada durante la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992) pretende lograr estabilizar las concentraciones de gases efecto invernadero en la atmósfera reduciendo las causas antropogénicas. La conservación de los bosques naturales y el aumento de las plantaciones de leñosas son esenciales para captar el dióxido de carbono que es el causante principal de tal efecto.

En esta línea, en el presente trabajo nos centraremos en el análisis de una especie ampliamente representada en algunos bosques tropicales. En concreto, los datos utilizados proceden de la Empresa Ciénaga de Zapata, ubicada en la península del mismo nombre, en la costa sur de la provincia de Matanzas, Cuba. La Ciénaga de Zapata contiene el humedal más grande del país, ha sido declarada área protegida, considerada por la UNESCO (2000) como reserva de la biosfera y en el 2001 el humedal fue declarado oficialmente “Sitio RAMSAR”. Se implementaron entonces planes de manejo y conservación para especies en peligro de extinción.

En el área que abarca la empresa, la especie más representada, ocupando el 40% de la superficie, es la *Lisyloma latissilicum Benth* (soplillo, de nombre común). Los usos fundamentales de la madera del soplillo son ampliamente reconocidos (Fors, 1975; Robles, 1978; Sablón, 1984). Sus propiedades la hacen aptas para madera en bolo y con fines energéticos. Cuando se hacen tratamientos silviculturales a estas masas, o se corta para el objetivo previsto, se pueden obtener otros surtidos como traviesas para ferrocarriles y maderas de pequeñas dimensiones.

Esta especie, como otras latifoliadas tienen una tasa de conversión del dióxido de carbono atmosférico en biomasa del 50%, es decir, acumulan 0,5 toneladas de

dióxido de carbono por cada metro cúbico de biomasa (IPCC, 1996) por lo que la hace muy significativa a la hora de evaluarla con fines ambientales.

A pesar de todo ello y de ser una especie nativa, no se tiene información relacionada con su turno de aprovechamiento. Así, nuestra finalidad será encontrar un rango eficiente de edades para los cuales se optimicen un conjunto de criterios económicos representados por el Valor Actual Neto y criterios ambientales, representados por el carbono capturado por la masa forestal. En la mayoría de los artículos que recoge la literatura al respecto, se ha abordado esta problemática en plantaciones puras, lo cual facilita el trabajo, pero estamos en el caso de un bosque natural, parcialmente manejado con fines productivos, en el cual aparecen en mezcla diversidad de especies y es por ello que, en nuestra modelización, trabajaremos sobre la base de un árbol individual, asumiendo las afectaciones que, desde el punto de vista teórico, tiene promediar valores como costes, gastos, etc.

2. Descripción del modelo para la determinación del turno óptimo.

La determinación del momento óptimo para talar un árbol o especie forestal constituye un problema clásico en el contexto forestal, y a ese momento se le conoce con el nombre de turno óptimo. Esta cuestión ha sido tratada desde una perspectiva técnica, la cual sólo tiene en cuenta la función de crecimiento del árbol, y desde una perspectiva económica, la cual incorpora aspectos monetarios. En este segundo caso, se pueden valorar sólo los recursos madereros (turno de Faustmann, 1849) o bien añadir los recursos no madereros que genera el bosque (turno de Hartman, 1975). No obstante, en el trabajo de Romero, Ros y Díaz-Balteiro (1998) se plantea la determinación del turno óptimo bajo la consideración simultánea de dos objetivos, uno económico (valoración monetaria de la producción de madera) y otro ambiental (toneladas de carbono almacenada en la biomasa) y en esta línea se encuadra la modelización que pasamos a desarrollar.

Como hemos comentado, nuestro análisis lo efectuaremos para un árbol, dentro de una especie ampliamente representada en un bosque natural cubano de la zona sur y en otros bosques tropicales. Lo primero que necesitamos es la función de

crecimiento, que denotaremos por $q(t)$ y que relaciona la producción de madera (m^3 /árbol) y la vida del árbol, (en años). A partir de los datos disponibles se hizo un ajuste por mínimos cuadrados y obtuvimos la siguiente expresión:

$$q(t) = -1,47 \times 10^{-2} + 1,074 \times 10^{-3} t^2 - 1,03 \times 10^{-5} t^3 \quad t \geq 5$$

Desde una perspectiva económica, la corta principal ha de realizarse en el instante en el que se haga máximo el valor actualizado neto de la inversión (VAN), teniendo en cuenta los ingresos derivados de la madera obtenida, así como los costes e ingresos procedentes de las distintas actividades realizadas. En nuestro caso, el VAN viene dado por la siguiente expresión:

$$VAN(t) = (P \cdot q(t)e^{-it} + \sum_{\forall L} c_L e^{-iL} - \sum_{\forall S} y_S e^{-iS} - K) \cdot (1 - e^{-it})^{-1} \quad (1)$$

donde P es el precio unitario de la madera (73,05 pesos), i es el tanto instantáneo de descuento (8%), K es el gasto correspondiente a los cuidados iniciales al árbol (0,1725 pesos) y c_L y y_S son, respectivamente, el ingreso y el coste procedentes de actividades silviculturales que se realizan sobre el árbol en el instante L y/o S . En concreto, en nuestro contexto, se realizan atenciones en los años 7, 12 y 20 de la vida del árbol, pero en el primer instante sólo se generan costes. La expresión anterior supone una cadena infinita de ciclos de corta, lo cual es equivalente a considerar implícitamente, la existencia de un coste de oportunidad o renta de la tierra. (Romero, 1994).

En cuanto al objetivo de la captura de carbono por árbol, hemos considerado tres alternativas:

Carbono total capturado, bajo la cual se considera que el carbono absorbido en el momento del turno es proporcional al volumen de madera en dicho instante ($gq(t)$) menos la emisión que se pueda producir a la atmósfera como consecuencia de la tala en dicho instante ($gbq(t)$). Por tanto,

$$S_1(t) = g q(t) - g b q(t) = (1 - b) g q(t) \quad (2)$$

donde γ es una constante (ton. de carbono/m³ de madera) que depende de la especie y que, en nuestro caso, asciende a 0,5. Por otra parte, b también es constante pero depende del uso que se haga de la madera obtenida, y para la especie bajo consideración toma un valor de 0,54.

Carbono total capturado por año, igual que la anterior pero promediando en años:

$$S_2(t) = \frac{S_1(t)}{t} \quad (3)$$

Carbono capturado descontado, (van Kooten, Binkley y Delcourt (1995)), de acuerdo con la cual la absorción de carbono en cualquier instante viene dado por $gq'(t)$, con lo cual el valor actual de los beneficios del carbono, considerando un turno de t años viene dado por:

$$\begin{aligned} S_3(t) &= gP_c \int_0^t q'(t).e^{-i.t} dt - g b P_c q(t)e^{-i.t} = \\ &= g(1-b)P_c q(t)e^{-i.t} + g.iP_c \int_0^t q(t)e^{-i.t} dt \end{aligned} \quad (4)$$

donde P_c es el precio o valor social implícito del carbono.

Si sólo maximizamos la función $VAN(t)$, obtenemos el turno óptimo desde el punto de vista económico, mientras que si sólo maximizamos la captura de carbono ($S_1(t)$, o $S_2(t)$ o $S_3(t)$) obtenemos el turno óptimo desde una perspectiva ambiental. Considerando simultáneamente ambos objetivos, podemos obtener un rango de edades eficientes entre las cuales podría escoger el decisor, de acuerdo con sus preferencias. Hemos considerado tres posibles problemas biobjetivos, combinando la función $VAN(t)$ con cada una de las tres posibles alternativas para la modelización de la captura de carbono. Denotaremos por P_i ($i=1,2,3$) al problema $\text{Max}_t \{VAN(t), S_i(t) \text{ (} i=1,2,3 \text{)}\}$.

Por otra parte, en un intento de reducir el conjunto de puntos eficientes, podemos también determinar el conjunto compromiso, es decir, aquellos puntos

eficientes que están más próximos al punto ideal (máximo valor actual neto, máxima captura de carbono), lo cual dependerá, lógicamente, de la métrica que se elija. No obstante, Yu (1973) demostró que para problemas biobjetivos, los puntos correspondientes a la métrica L_1 y L_∞ constituyen dos cotas para todas las posibles soluciones compromiso. Además, este conjunto compromiso recoge el óptimo social siempre que la hipotética función de bienestar social, dependiente del VAN y la captura de carbono, tenga un comportamiento coherente con la ley de las relaciones marginales de sustitución (Romero, Ros y Díaz-Balteiro (1998)). De ahí también, la importancia de su determinación. Los problemas para determinar el punto compromiso mediante la métrica L_1 , dependiendo de la alternativa escogida para la captura de carbono, son:

$$\begin{aligned} \underset{t}{Min} \quad & w_1 \frac{VAN^* - VAN(t)}{VAN^* - VAN_*} + w_2 \frac{S_i^* - S_i(t)}{S_i^* - S_{i*}} \\ \text{s.a.} \quad & (1) \\ & (2) \text{ ó } (3) \text{ ó } (4) \end{aligned}$$

donde VAN^* y VAN_* son, respectivamente, el punto ideal y el anti-ideal del objetivo económico, y de manera análoga hemos denotado para el otro objetivo tales puntos, y w_1 , w_2 son los pesos o importancia asignada a cada uno de los objetivos

Por otra parte, los problemas correspondientes a la métrica L_∞ son:

$$\begin{aligned} \underset{t}{Min} \quad & d \\ \text{s.a.} \quad & d \geq w_1 \frac{VAN^* - VAN(t)}{VAN^* - VAN_*} \\ & d \geq w_2 \frac{S_i^* - S_i(t)}{S_i^* - S_{i*}} \\ & (1) \\ & (2) \text{ ó } (3) \text{ ó } (4) \end{aligned}$$

bajo los cuales se minimiza la máxima desviación.

3. Análisis de los resultados.

La resolución de los problemas generados no se puede realizar fácilmente por métodos tradicionales y hemos utilizado un método metaheurístico para la aproximación del conjunto eficiente, denominado MOAMP (MultiObjective Adaptative Memory Procedure), implementado en entorno Windows, utilizando el lenguaje C++ 6.0 (Caballero, Molina y Rodríguez, 2003). Este método tratará de adaptar una búsqueda tabú a la estructura particular del conjunto eficiente de un problema multiobjetivo.

En el problema P1 el punto ideal es (6,864; 0,394) y los turnos eficientes van desde 21 hasta 70 años, mientras que en el problema P2 el punto ideal es (6,864; 0,006) y los turnos eficientes van desde 21 hasta 52 años, por último, para P3 el punto ideal es (6,864; 0,1) y los turnos eficientes oscilan desde 21 hasta 95 años. En consecuencia, el rango más amplio se obtiene en el último caso, mientras que el más pequeño se produce al maximizar la captura de carbono por año, que sólo llega hasta los 52 años, coincidiendo con el turno óptimo técnico. En general, el turno económico es más pequeño que el técnico, y éste es más pequeño que el ambiental. Hemos de tener en cuenta que los arboles tropicales tienen un crecimiento rápido y los turnos obtenidos son sensiblemente inferiores a los de especies que se desarrollan en otras latitudes, aunque la relación anterior entre los turnos se mantiene en cualquier bosque.

Por otra parte, hemos determinado las cotas del conjunto compromiso para cada uno de los tres problemas bicriterios, considerando que los dos objetivos tienen la misma importancia ($w_1 = w_2 = 1$) y los resultados se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 1: problema P1

	VAN (pesos/árbol)	Carbono total capturado (tm/árbol)	Turno (años)
VAN	6,864	0,084	21
Carbono total capturado	1,103	0,395	70
Cota L_1	1,496	0,382	62
Cota L_∞	3,905	0,240	40

Tabla 2: problema P2

	VAN (pesos/árbol)	Carbono capturado por año (tm/árbol)	Turno (años)
VAN	6,864	0,0040	21
Carbono capturado por año	2,314	0,0064	52
Cota L_1	4,591	0,0056	33
Cota L_∞	4,453	0,0056	33

Tabla 3: problema P3

	VAN (pesos/árbol)	Carbono descontado (tm/árbol)	Turno (años)
VAN	6,864	0,044	21
Carbono descontado	0,666	0,100	95
Cota L_1	4,568	0,077	36
Cota L_∞	4,398	0,079	37

Se puede observar que el conjunto compromiso correspondiente al problema P1 es el más grande, mientras que el de los otros dos es bastante parecido, en lo que respecta a los turnos correspondientes, dejando fuera el turno técnico óptimo de 52 años. Como se desprende de los datos, en los dos últimos problemas el valor actualizado neto de la inversión tiene más incidencia sobre la solución que la captura de carbono. A partir de estos resultados nos planteamos analizar la incidencia que sobre el conjunto compromiso del problema P1 puede tener la variación de algunos de los parámetros empleados en la modelización, como por ejemplo, la tasa de descuento i y el valor de b que, recordemos, depende del uso al que se destine la madera obtenida.

Tabla 4. Cotas del conjunto compromiso para diferentes tasas de descuento.

i	Turno (años)	VAN (pesos/árbol)	Carbono total (tm/árbol)	Volumen (m ³ /árbol)
0,01	$L_1=L_\infty= 57$	154,579	0,360	1,567
0,03	$L_\infty=50$	31,163	0,318	1,383
	$L_1=51$	30,650	0,325	1,412
0,05	$L_1=L_\infty= 45$	11,795	0,281	1,222
0,08	$L_\infty= 40$	3,905	0,240	1,045
	$L_1=62$	1,496	0,382	1,659

Tabla 5. Cotas del conjunto compromiso para diferentes valores de b

b	Turno (años)	VAN (pesos/árbol)	Carbono total (tm/árbol)	Volumen (m ³ /árbol)
0	$L_{\infty}=40$	3,905	0,522	1,045
	$L_1=62$	1,496	0,830	1,659
0,25	$L_{\infty}=40$	3,905	0,392	1,045
	$L_1=62$	1,496	0,622	1,659
0,75	$L_{\infty}=40$	3,905	0,131	1,045
	$L_1=62$	1,496	0,207	1,659

En la tabla 4 podemos observar que el turno óptimo correspondiente a la cota L_{inf} decrece cuando aumenta el tipo de descuento, mientras que la otra cota decrece hasta que el tanto llega al 5% y después aumenta. Por el contrario, en la tabla 5 podemos apreciar que los turnos que conforman el conjunto compromiso no se encuentran afectados por el valor de b , aunque, lógicamente, el conjunto eficiente sería distinto en cada caso.

Por otra parte, siguiendo el planteamiento realizado por Romero, Ros y Díaz-Balteiro (1998), podemos calcular un rango para el precio al que se podría valorar tanto el efecto positivo de la captura de carbono, como el efecto negativo que supone la liberación de parte del carbono almacenado en el árbol. En nuestro caso dicho precio oscilaría entre 154 pesos por tonelada de carbono absorbido, correspondiente a la cota L_1 de 40 años, y 278 pesos/t., asociado a la cota L_{∞} . Este precio es equivalente a 77-139 pesos/m³ de madera, lo cual muestra que, al tener en cuenta el impacto ambiental, el valor social es superior al valor de mercado que asciende a 73,05 pesos/m³.

4. Conclusiones.

En este trabajo hemos abordado la cuestión de determinar la edad óptima de aprovechamiento de una especie muy abundante en la zona sur de Cuba, para la cual se desconoce su turno óptimo.

Para ello hemos tenido en cuenta dos tipos de criterios, uno económico que se formaliza mediante el valor actual neto y otro ambiental que recoge la captura de carbono en la biomasa vegetal y que hemos formalizado mediante tres alternativas,

considerando carbono total, carbono por año o carbono descontado. Si sólo se tiene en cuenta el objetivo económico el turno óptimo es de 21 años, mientras que el objetivo ambiental tiende a alargar el momento de la corta. Hemos obtenido un rango eficiente de turnos más grande en el caso de que se utilice el carbono total que para las otras dos alternativas, mientras que si utilizamos el carbono por año, el rango de turnos eficientes llega hasta el turno técnico. Por otra parte, en cuanto al conjunto compromiso, el rango obtenido para los problemas P2 y P3 conlleva unos turnos que están alejados del óptimo técnico, mientras que para el problema P1 dicho turno técnico está dentro del conjunto compromiso. Centrándonos en este último caso, hemos comprobado que la tasa de descuento influye sensiblemente en dicho conjunto, mientras que éste no se modifica si alteramos el parámetro que mide la emisión de carbono a la atmósfera en el momento de la corta (*b*). Por tanto, independientemente del uso al que se destine la madera obtenida, es aconsejable alargar los turnos por el papel importante que juegan estos árboles tropicales como sumideros de carbono.

Por otra parte, resaltar que la resolución de los problemas no-lineales enteros generados se ha llevado a cabo mediante un metaheurístico para Programación Multiobjetivo basado en una búsqueda Tabú, dado que no se pueden aplicar los métodos tradicionales de optimización, puesto que la función relativa al VAN está definida a trozos y en una de las alternativas para el carbono aparece una integral.

Bibliografía.

1. Caballero, R., Molina, J. y Rodríguez, M.V. (2003): "MOAMP: Programación Multiobjetivo mediante un Procedimiento de Búsqueda Tabú". II Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. Gijón 2003.
2. Faustmann, M. (1849): "Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry". *Journal of Forest Economics*, I ,pp 7-44
3. Forst, A. (1975): *Maderas Cubanas*. Pueblo y Educación, La Habana.

4. Hartman,R. (1976): "The harvesting Decision when a Standing Forest has Value". *Economic Inquiry*, **14**, pp.52-58
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1996): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook and Reference Manual Revised Version 1996. UNEP.WMO Module 1,4,5.
6. Robles, F. (1978): "Propiedades y Uso de 14 Especies de Maderas Tropicales de Rápido Crecimiento del Campo Experimental Forestal: el Tormento". *Revista de Ciencia Forestal*, **16**, pp. 32-44.
7. Romero, C. (1994): *Economía de los Recursos Ambientales y Naturales*, Alianza Economía, Madrid.
8. Romero, C., Ros, V. y Díaz-Balteiro, L. (1998): "Optimal Forest Rotation Age when Carbon Captured is Considered: Theory and Applications", *Journal of the Operational Research Society*, **49**, pp. 121-131.
9. Sablón, M.(1984): *Dendrología*. Pueblo y Educación, La Habana.
10. van Kooten, G.C., Binkley, C.S. y Delcourt, G. (1995): "Effect of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services", *Amer. J. Agr. Econ.*, **77**, pp. 365-374.
11. Yu, P.L.(1973): A Class of Solutions for Group Decision Problems. *Management science* **19**, pp 936-946.