
RÉGIMEN ÓPTIMO PARA PLANTACIONES DE EUCALIPTOS

EN BRASIL: UN ANÁLISIS NO DETERMINISTA

Luiz C.E. Rodríguez y Luis Díaz-Balteiro

RESUMEN

A diferencia de otras plantaciones en las cuales no existe la posibilidad de gestionar su capacidad de rebrote, en el manejo de los eucaliptares es frecuente que el turno óptimo no sea optimizado. Resulta habitual que se fije en el momento inicial un turno, que se mantenga constante en cada uno de los rebrotos, o bien que se desprece la capacidad de rebrote volviendo a replantar después de realizar la corta final. En este trabajo se pretende, mediante la utilización de técnicas como

la programación dinámica y la simulación Monte Carlo, optimizar tanto la duración de cada rebrote como el número de ellos de acuerdo a distintas variables, entornos (determinista y estocástico) y parámetros previamente definidos. Con el fin de ilustrar esta metodología, se analiza el caso de una plantación de eucaliptos en Brasil. Los resultados muestran cómo la duración óptima del régimen de corta puede experimentar cambios significativos al introducir en el análisis diversas hipótesis.

SUMMARY

Distinct from other plantations, *Eucalyptus* plantation managers have to decide whether all trees will be replaced by new seedlings after a harvest or simply allowed to regenerate from the sprouting stumps. Defining the length and the number of rotations in this type of coppice regime is not a trivial task. In most cases, the optimal sequence of rotations, or optimal cop-

pice regime, is not implemented. This paper considers the non-determinism of several parameters affecting the decisions, and applies dynamic programming and Monte Carlo simulation to define the optimal coppice regime of *Eucalyptus* plantations in Brazil. The results show how the optimal recommendation is significantly affected by changes in the hypothesized parameters.

Introducción

La aplicación de la teoría del turno económicamente óptimo a los sistemas silvícolas basados en el monte bajo no ha sido tratada con suficiente profusión en la literatura forestal, aunque existen algunas diferencias notables para este caso particular. Así, a diferencia de las masas que no rebrotan de cepa o de raíz, es preciso calcular tanto la duración de cada rebrote como el número de ellos que optimizan el rendimiento financiero del propietario. En uno de los primeros trabajos que han abordado este problema, Medema y Lyon (1985), a partir de la solución de Faustmann (1849), plantearon un procedimiento iterativo para el cálculo de ambas variables

(edad óptima y número de rebrotos). En la misma línea, Tait (1986) empleó la programación dinámica para resolver el problema, encontrando interesantes relaciones para el cálculo del manejo óptimo entre el caso de una masa regular y una procedente de monte bajo. Bajo una óptica más amplia, Chang (1998) se planteó una solución generalizada al paradigma de Faustmann utilizando también la programación dinámica. A priori, una masa tratada bajo un sistema de monte bajo podría gestionarse según esta solución, aunque parece más pensada para masas regulares. Finalmente, otros autores (Smart y Burgess, 2000) funden los planteamientos de Chang y Tait a través de un modelo recursivo en el que se

introducen diversos *outputs* no madereros.

La determinación del turno óptimo cuando se consideran dos *outputs* marcadamente diferentes, como son la producción de madera y la captura de carbono, es un problema que se ha abordado en la literatura forestal desde los años 90. En esa época se publicaron trabajos seminales (Hoen y Solberg, 1994; van Kooten *et al.*, 1995) donde se construyen modelos diferentes para integrar estos dos objetivos. Utilizando una técnica multicriterio como es la programación compromiso también se puede abordar este problema (Romero *et al.*, 1998). Por otro lado, numerosos trabajos que han estudiado este caso de producción conjunta han estimado el costo de la captura de carbono como

el costo de oportunidad en función de diversos usos de la tierra y del comportamiento del propietario de la misma (Richards y Strokes, 2004; van Kooten *et al.*, 2004).

La programación dinámica constituye una metodología empleada en la gestión forestal, desde ya hace varias décadas. Se pueden hallar diversas aplicaciones de esta técnica a la gestión forestal: cálculo del régimen óptimo de tratamientos culturales en masas regulares, optimización conjunta de distintas labores silvícolas y del turno óptimo, manejo de masas irregulares, restricciones de contigüidad dentro de los modelos forestales de planificación táctica, etc. (Hoganson y Borges, 1998; Borges y Hoganson, 1999; Cacho *et al.*, 2003).

PALABRAS CLAVE / *Eucalyptus* / Manejo Forestal / Plantaciones / Programación Dinámica / Turno Óptimo /

Recibido: 19/06/2006. Aceptado: 06/09/2006.

Luiz C. E. Rodríguez. Ingeniero Agrónomo y PhD in Forest Biometrics and Management por la University of Georgia, USA. Profesor de la Universidad de São Paulo. Dirección

LCF/ESALQ/USP - C. Postal 9, 13418-900 Piracicaba, SP, Brasil.
e-mail: lcer@esalq.usp.br
Luis Díaz-Balteiro. Doctor Ingeniero de Montes, Universidad

Politécnica de Madrid, España. Profesor Titular. Dirección: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Departamento de Economía y Gestión Forestal. Ciudad Universitaria

s/n, 28040, Madrid, España.
e-mail:
luis.diaz.balteiro@upm.es

Diferente de outras plantações nas quais não existe a possibilidade de gestionar sua capacidade de rebrote, no manejo dos eucaliptais é freqüente que o turno ótimo não seja maximizado. Resulta habitual fixar no momento inicial um turno, ou que se mantenha constante em cada um dos rebrotos, ou bem que se deprecie a capacidade de rebrote voltando a replantar depois de realizar o corte final. Neste trabalho se pretende, mediante a utilização de técnicas como a programação dinâ-

mica e a simulação Monte Carlo, aperfeiçoar tanto a duração de cada rebrote como o número deles de acordo a distintas variáveis, entorno (determinista e estocástico) e parâmetros previamente definidos. Com o fim de ilustrar esta metodologia, se analisa o caso de uma plantação de eucaliptos no Brasil. Os resultados mostram como a duração ótima do regime de corte pode experimentar mudanças significativas ao introduzir na análise diversas hipóteses.

Para introducir el riesgo o la incertidumbre en el análisis, el método Monte Carlo ha sido frecuentemente empleado en el manejo forestal. Esta técnica se ha utilizado para predecir ciertos aspectos espaciales relativos a diferentes hábitats (Carlsson *et al.*, 1998). Asimismo, se ha empleado con éxito para comparar diversos rodales no productivos dentro de una masa (Ask y Carlsson, 2000), para simular diversos parámetros en modelos espaciales relacionados con diversas forestaciones en Canadá (McKenney, 2004), o para computar el valor actual neto en diversos proyectos forestales (Klemperer, 2001). En esta línea, otros autores han utilizado este método para comparar dos alternativas selvícolas introduciendo la incertidumbre en los precios esperados de la madera (Knocke *et al.*, 2002).

El propósito de este trabajo es comprobar, utilizando las técnicas arriba descritas, cuál sería la secuencia óptima de corta en una plantación de eucaliptos de Brasil, suponiendo dos escenarios: uno determinista y otro en el cual se introduce el riesgo en el análisis. Además, para cada escenario se tendrá en cuenta el posible impacto de la existencia de una prima por cada tonelada métrica de carbono capturada, según tres casos distintos.

Es preciso destacar que la metodología aquí expuesta se podría asimilar a cualquier plantación susceptible de rebrotar de cepa, con independencia de las variaciones en la producción en cada rebrote. En particular, se puede extender a otras plantaciones del

género *Eucalyptus* en América del Sur (Paredes, 2001; Sánchez-Acosta y Minetti, 2001; Sánchez-Acosta y Vera, 2005).

En primer lugar se mostrarán los casos a estudiar, así como las bases metodológicas de la programación dinámica y luego se mostrarán los resultados obtenidos, para finalizar con un apartado que integra la discusión y conclusiones.

Material y Métodos

Cerca de $3,5 \times 10^6$ ha de plantaciones intensivas de eucaliptos son gestionadas actualmente en Brasil con el fin de abastecer la industria de pasta de papel, que produce más de 10×10^6 ton de pasta al año (ABRAF, 2006). Estas plantaciones se caracterizan, al igual que en otros países, por emplear en su gestión el método de beneficio de monte bajo, gracias a los bajos costos de los sucesivos rebrotos (Ribeiro y Graça, 1996). No obstante, la corta duración del turno (6-7 años), así como los programas de mejora genética, han hecho posible que en algunos casos la mejor decisión sea reiniciar la plantación y no proseguir con el monte bajo. La producción en los sucesivos rebrotos después de la plantación puede ser muy variable, debido a factores relacionados con la gestión, o bien a factores externos (Rodríguez, 1999). En este trabajo se ha supuesto que la producción del primer rebrote es un 10% menor que la producción asociada a la plantación inicial. Además, la producción del segundo rebrote es un 5% menor que la del primer rebrote, y la del tercer rebrote

un 5% menor que la producción del segundo rebrote.

En la Tabla I se muestran los costos anuales asociados a plantaciones de árboles clonados de matrices genéticamente relacionadas con *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* ST Blake en el estado de São Paulo. En cuanto a la estimación de la producción, se ha utilizado el modelo de Schnute (1981) para ajustar la producción antes del primer rebrote en estas masas para dos índices de sitio. El índice de sitio 34 alcanza a los 6 años un volumen de $530 \text{ m}^3/\text{ha}$, y una altura dominante de 34m con 1660pies/ha, mientras que para el índice de sitio 24 la producción para esa edad y ese marco de plantación es de $179 \text{ m}^3/\text{ha}$, con una altura dominante de 24m. Por último, en cuanto a la vertiente financiera, inicialmente se asume que el precio de la madera, obtenido como la media del precio real de venta en el Estado de São Paulo durante el año 2005, se sitúa en los 25 €/m^3 (CEPEA, 2006), y se ha utilizado una tasa de descuento del 8%.

En cuanto al carbono capturado por estas plantaciones,

únicamente se ha contabilizado aquel capturado por la parte aérea no radical de las plantas (tronco y biomasa arbórea). Es decir, se ha partido del volumen asociado a cada turno, índice de sitio y rebrote para transformarlo en carbono multiplicándolo por la densidad (se ha tomado una densidad media de $0,655 \text{ ton/m}^3$, valor medio obtenido del trabajo de Scanavaca y García (2004) y por la proporción de carbono en la madera (0,5). Para computar el carbono asociado a la biomasa arbórea excluyendo el tronco se ha multiplicado por un factor de expansión de 1,5 (Penman *et al.*, 2003).

Se han considerado tres casos posibles para la integración del carbono en nuestro análisis. El caso 1 no considera la introducción del carbono capturado en el análisis. El caso 2 asume que todo el carbono se oxida en el momento de la corta, hipótesis vigente hoy en día en el Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1997). Finalmente, el caso 3 considera la posibilidad que el 50% del carbono acumulado en el momento de la corta pase a productos derivados del papel,

TABLA I
COSTOS ASOCIADOS A LA PLANTACIÓN FORESTAL

Año	Concepto	Costo (€/ha)
0	Preparación del terreno y costos de plantación	639
1	Limpieza, fertilización y control de hormigas	155
2	Limpieza	100
3	Limpieza	95
t + 1*	Limpieza, fertilización y control de hormigas	120
t + 2*	Selección rebrote	150
t + 3*	Limpieza, control de hormigas	95
Anual	Costos anuales y otros costos fijos	30

* En t+k, t: año corta final, k: año después de corta final.

y este carbono es re-emitido linealmente durante los 5 años siguientes a la corta (Bateman y Lovett, 2000). El 50% restante es dividido en dos componentes: la mitad es oxidado durante la corta final y el restante 25% se re-emite linealmente durante los 15 años siguientes a la corta (van Kooten *et al.*, 1999). No se ha contemplado el reciclado de los productos celulósicos. Por último, un precio inicial de 10€/ton se ha tomado como referencia para el escenario determinista.

Bajo un entorno no determinista, las variables que se han tomado como estocásticas han sido tres. En primer lugar, el precio de la madera, del que a partir de una serie histórica de precios reales desde ago 2002 hasta ene 2006 en el Estado de São Paulo, obtenidas a través de boletines mensuales locales (CEPEA, 2006), se ha ajustado una distribución normal con el fin de definir la función de densidad correspondiente. Para la segunda variable, la tasa de descuento, se asume una distribución triangular, con un 8% de media y límites del 6 y del 18%. Por último, para el precio del carbono capturado, que constituye la tercera variable, se ha supuesto una distribución exponencial basada en los datos recogidos en una serie histórica obtenida en la base de datos Point Carbon desde jun 2003 a mar 2006 (Point Carbon, 2006).

Metodología

La propuesta básica de Faustmann (1849) para el cálculo del turno óptimo consistió en introducir la renta de la tierra en el análisis de la solución de Fisher-Hotelling (Romero, 1997). Existen dos formas de introducir esta renta de la tierra: suponer la existencia de una cadena infinita de ciclos de corta, o bien introducir explícitamente la renta de la tierra en la ecuación correspondiente. Siguiendo el primero de los caminos, de forma general el turno económicamente óptimo

vendrá dado por la maximización del valor esperado del suelo (VES):

$$VES = \frac{\sum_z VAN_z - \sum_z RE_z}{1 - e^{-iT}} \quad (1)$$

con $T = \sum t_k$, y donde t_k sería el turno, mientras que VAN_z define el valor actual neto asociado a cada corta final, con independencia de si la masa procede de plantación o de rebrote. Tanto los ingresos motivados por la venta de madera con destino fundamentalmente para pulpa y a los créditos asociados a la captura de carbono, como los gastos, se desglosan en la Ec. 2. Como se ha comentado, el número de cortas (z) antes de que se inicie un nuevo ciclo de monte bajo puede variar entre 1 y 4, y el turno (t_k) varía entre 5 y 9 años. T constituye el ciclo óptimo (suma de los distintos turnos, con independencia de su origen). Por último, RE_z sería la suma del valor del carbono capturado por la masa emitido después de la corta final y descontado al momento inicial, tal y como se puede apreciar en la Ec. 3.

A continuación, se desglosan algunos componentes de la Ec. 1:

$$VAN_z = I(t_k)e^{it_k} - K - G \frac{e^{-i(t_k-1)} - 1}{(e^{-i}-1)} - \sum_j Y_j e^{ij} + \sum_{j=1}^{j=k} I_c(t_j)e^{it_j} \quad (2)$$

con $I_c(t_j) = P_c \times \Delta V b_j$, y con $\Delta V b_j = p \times C_c \times f \times \Delta V(t_j)$, y donde $I(t)$: ingreso de la corta final (con independencia si proviene de plantación o de rebrote), K : costo de plantación, G : gastos anuales asociados a la plantación, e Y_j : suma de las distintas operaciones culturales realizadas en la masa. La tasa de descuento se representa por i , y se emplea la misma tasa tanto para la madera como para el carbono. El último término, $I_c(t_j)$ proporciona los ingresos descontados relativos a la captura de carbono. Estos ingresos se corresponden a la suma del crecimiento corriente de la masa ($\Delta V b_j$) multiplicado por el precio del carbono (P_c). El crecimiento corriente de la masa se calcula como el

producto del incremento anual en volumen $\Delta V(b_j)$ por tres parámetros: la densidad de la madera (p), el contenido en carbono (C_c), y el factor de expansión de la biomasa (f).

Por último, para obtener el valor actual del carbono emitido en la corta (RE_z) se hace preciso calcular, en primer lugar, el carbono emitido en el momento de la corta es calculado para cada año después de la corta (RE_1). Este carbono emitido se obtiene a partir del carbono asociado a la biomasa (BC_c), que se multiplica por el precio del carbono (P_c) y por el parámetro P , que varía de acuerdo a la cantidad de carbono emitido, pudiéndose dar tres posibilidades (x): el carbono se almacena en los productos, el carbono emitido cuando la biomasa es quemada y el carbono emitido en los 15 años siguientes a la corta. Se obtiene

$$RE_z = \sum_{l=1}^{l=50} RE_l e^{-i(t_k+l)} \quad (3)$$

con $RE_l = P_c \sum_x pBCr$

Cuando se presentan una serie de decisiones interrelacionadas, los métodos clásicos de optimización como la programación lineal no resultan efectivos. La programación dinámica, en cambio, proporciona un procedimiento que permite resolver este tipo de problemas, similar al que nos ocupa. A diferencia de la programación lineal, la programación dinámica no cuenta con una formulación matemática unánimemente aceptada. Simplemente proporciona un marco general al que se debe adaptar la formulación de un determinado problema.

En el caso de la optimización del manejo de masas procedentes de monte bajo, la idea básica que subyace sería que al efectuar una corta final se debe tomar una decisión: solo cortar, o bien cortar y volver a replantar, con independencia de la edad de la masa a la cual se plantea esta disyuntiva. Según la termi-

nología de la programación dinámica, las características de la masa (edad, número de rebrote, etc.) a una determinada edad constituyen un estado. Por otro lado, el número máximo de posibles rebrotes que el gestor considera oportuno para la especie fijaría el número de etapas del problema. Una decisión implica moverse desde un estado y etapa hasta otro estado diferente en la siguiente etapa.

Una posible forma de abordar la solución al problema consiste en comenzar por la penúltima etapa y ver cuál es la decisión óptima que conduce a un mejor valor de la función objetivo en la última etapa (Hillier y Lieberman, 1991). A continuación, y a través de un proceso iterativo, se repite el proceso de atrás hacia delante, hasta llegar al estado inicial, obteniéndose así la solución óptima al problema. Utilizando la notación anteriormente introducida, para una etapa k , el valor esperado del suelo óptimo (VES_k^*) será

$$VES_k^* = \max(VES_k' + (VES_{k+1}^*)e^{-it_k}) \quad (4)$$

donde VES_k' : valor esperado del suelo correspondiente a la etapa k , mientras que VES_{k+1}^* : valor esperado del suelo óptimo correspondiente a la etapa $k+1$, i : tasa de descuento, y t_k : lapso de tiempo existente entre ambas etapas.

Si la Ec. 4 se lleva convenientemente hasta la etapa inicial, se obtendrá el valor óptimo buscado. Para este caso se han considerado 4 etapas (plantación y tres posibles rebrotes), con un turno que puede oscilar entre los 5 y los 9 años. En total se han definido 780 estados diferentes.

Con el fin de integrar en el análisis posibles fluctuaciones de ciertos parámetros clave que intervienen en la metodología arriba mostrada, se ha introducido un escenario con variables no deterministas en el que se va a emplear una simulación tipo Monte Carlo, aunque *a priori* se podrían abordar otras técnicas, como una programación dinámica estocástica (ca-

TABLA II
RÉGIMEN ÓPTIMO Y VALOR ESPERADO DEL SUELO (VES) PARA EL ESCENARIO DETERMINISTA

Caso	Índice de sitio	Precio carbono (€/ton)	Régimen óptimo*	VES (€/ha)
1	34	0	12(1)	7,949
	24	0	14(1)	4,902
2	34	10	12(1)	8,223
		25	13(1)	8,657
		50	27(2)	9,884
2	24	10	14(1)	5,143
		25	15(1)	5,515
		50	17(1)	6,270
3	34	10	12(1)	8,715
		25	13(1)	9,869
		50	14(1)	11,912
3	24	10	14(1)	5,500
		25	14(1)	6,399
		50	16(1)	7,968

* Entre paréntesis el número de rebrotes asociado a cada ciclo.
Caso 1: sin carbono; Caso 2: todo el carbono es liberado en la corta; Caso 3: mitad del carbono liberado en la corta y la otra mitad liberado linealmente durante los cinco años siguientes.

denas de Markov), que han sido descartadas por su mayor complejidad operacional.

El método Monte Carlo trata de resolver problemas matemáticos a través de la simulación de los valores de ciertas variables aleatorias (Sobol, 1994). Este método se puede aplicar tanto en situaciones de riesgo, donde se conocen las funciones de densidad de las probabilidades para ciertas variables, como en situaciones de incertidumbre, donde dichas probabilidades son desconocidas. En este caso el método Monte Carlo se asimila a un análisis de sensibilidad. Si se conocen las funciones de densidad de estas probabilidades, el método comienza con una muestra aleatoria de valores generados por dichas funciones de densidad. Este proceso continúa a través de múltiples simulaciones hasta que el modelo converge a resultados estables. Así, el resultado final es tomado como una media sobre las observaciones obtenidas a lo largo de todas las simulaciones (10000).

Resultados

Para el escenario determinista los resultados muestran

(Tabla II) cómo la longitud del turno es sensible al índice de sitio, siendo más largo para el índice de sitio 24. Así, mientras que para el mejor índice de sitio y el caso 1 el ciclo total alcanza los 12 años, en la calidad II se alarga hasta los 14 años, con dos turnos de 7 años.

Cuando se introduce el carbono (casos 2 y 3) las modificaciones en cuanto al turno óptimo son bastante moderadas con respecto al caso 1, sobre todo cuando el precio del carbono no supere los 25€/ton. Así, se observan ligeros alargamientos en el turno cuando el precio del carbono supera los 10€/ton. La única excepción a este hecho lo constituye la combinación entre el mejor índice de sitio, el caso 3, y un precio de 50€/ton. Para estas condiciones, el turno se alarga hasta los 27 años (tres turnos idénticos de 9 años). En definitiva, conviene resaltar el alargamiento de los turnos para precios de carbono más altos (de 6 hasta 7 a 8 años), pero no se observan modificaciones importantes en el régimen óptimo cuando se cambia la

TABLA III
RÉGIMEN Y VALOR ESPERADO DEL SUELO (VES) PARA EL ESCENARIO NO DETERMINISTA

Caso	Índice de sitio	Precio carbono (€/ton)	Régimen óptimo*	VES (€/ha)
1	34	0	18(2)	1,684
	24	0	21(2)	721
2	34	est.	12(1)	3,760
	24	est.	21(2)	2,138
3	34	est.	12(1)	4,313
	24	est.	14(1)	2,517

* Entre paréntesis el número de rebrotes asociado a cada ciclo.

Caso 1: sin carbono; Caso 2: todo el carbono es liberado en la corta; Caso 3: mitad del carbono liberado en la corta y la otra mitad liberado linealmente durante los cinco años siguientes.

est: variable estocástica asociada a una distribución exponencial de una serie histórica del precio de cada tonelada de carbono

estrategia de liberación del carbono.

Si el VES es analizado bajo el escenario determinista, las diferencias en cuanto al índice de sitio son más acusadas. En efecto, si se compara el VES entre los dos índices de sitio sin tener en cuenta el carbono capturado, se comprueba cómo se produce una diferencia superior al 60%. Por otro lado, la introducción de un posible pago por el carbono capturado no presenta diferencias apreciables entre los dos índices de sitio. Así, para el caso 2 las variaciones oscilan entre 3 y 15% comparándolas con el caso 1, mientras que para el caso 3 el VES para los dos índices de sitio varía desde 9 a 12% con un pago por el carbono de 10€/ton, hasta un 50% cuando la prima se eleva hasta los 50€/ton.

Si se analiza ahora el escenario no determinista (Tabla III), se aprecia cómo se han producido diferencias notables en algunos casos, tanto para la duración del régimen óptimo, como y fundamentalmente para el VES. En efecto, para el caso 1 el ciclo óptimo comprende 2 turnos procedentes de rebrote, con independencia del índice de sitio considerado, abarcando una duración total del régimen de 18 y 21 años, respectivamente. Para el caso 2, se sigue manteniendo el mismo régimen para el peor índice de sitio, mientras que la calidad I ya

ha reducido un turno, pasando el ciclo a 12 años. Por último, el caso 3 obtiene ciclos que solo presentan un rebrote y alcanzan turnos similares a los del escenario determinista para un precio del carbono de 10€/ton (12 años para la calidad I y 14 años para la calidad II).

En cuanto al VES, las diferencias son muy pronunciadas. Para el caso 1 la adopción de un entorno determinista o estocástico supone variaciones en el VES del orden de 3 a 5 veces. Al introducir los casos que incorporan pagos sobre el carbono capturado, estas diferencias se acortan, pero no dejan de ser muy elevadas. Por ejemplo, en el caso 3, para un pago de 10€/ton bajo un entorno determinista, el VES obtenido es aproximadamente el doble que en ese mismo caso para el entorno estocástico.

Discusión y Conclusiones

La metodología propuesta ha mostrado su potencialidad para abordar el problema de determinar tanto la duración óptima del turno como del número de ciclos de que está compuesto. No obstante, es preciso señalar que no se han obtenido las mismas pautas que en otros estudios que han abordado este problema (Medema y Lyon, 1985; Tait, 1986) en cuanto al carácter decreciente de la duración de

los sucesivos rebrotes dentro del turno.

Los resultados para el caso determinista muestran una alta rentabilidad de estas plantaciones en la actualidad, con independencia de la posibilidad de pagos asociados a la captura de carbono. Esta alta rentabilidad se fundamenta, en parte, en el continuo incremento de los precios de la madera de eucalipto que se ha venido produciendo en el Estado de São Paulo durante los últimos años. A título de ejemplo, en términos reales este precio se ha multiplicado por 2,47 veces de dic 2002 a dic 2005. Este incremento produce una cierta inelasticidad a la hora de variaciones en el régimen óptimo. En Díaz-Balteiro y Rodríguez (2006) se muestran los resultados de un análisis de sensibilidad respecto del precio de la madera con diversos precios para la madera de eucalipto (8, 12 y 16€/m³), apreciándose un mayor rango de variación. De todas formas, se observa cómo se cumple el análisis habitual de estática comparativa asociado al paradigma de Faustmann: a mayores precios, menor duración del régimen óptimo.

Esta circunstancia explica la gran diferencia existente entre la solución determinista y la estocástica en relación tanto al VES como la duración del régimen óptimo, que es sensiblemente más largo en el caso 1. Es preciso recordar que el rango de precios considerado en este escenario desciende hasta los 10€/m³, lo que da una idea de la mayor variabilidad en cuanto a los posibles resultados obtenidos.

En cuanto a la introducción de una prima por cada tonelada de carbono, las plantaciones de Brasil muestran una sensibilidad moderada ante este hecho, con resultados bastante similares en cuanto al régimen óptimo en ambos escenarios. Hay que destacar, no obstante, el aumento de rentabilidad que se produce al comparar los resultados asociados al caso 2 (la metodología actualmente asociada al Protocolo de Kyoto) y el caso

3 (introducción del carbono asociado a los productos).

Los resultados obtenidos muestran cifras en cuanto a la duración del turno similares a las adoptadas en la realidad. Es preciso apuntar que el precio de la tierra en el caso considerado (Estado de São Paulo) es uno de los más caros del país, oscilando actualmente entre 1500 y 2000€/ha. Los resultados obtenidos muestran que la rentabilidad de este tipo de inversiones está garantizada. Asimismo, no se descarta que hoy en día los crecimientos en las plantaciones más recientes sean mayores que los utilizados en este trabajo, lo que favorecería aún más este hecho.

Además, es preciso apuntar que la metodología desarrollada en este trabajo puede fácilmente incorporar un nuevo estado que refleje la posibilidad de efectuar una plantación, pero con otro material genético y/o silvicultura que ofrezca una mayor producción (ver Whittcock *et al.*, 2004, para un ejemplo similar). El resultado óptimo ofrecería las condiciones para aceptar esta nueva opción que puede proporcionar el avance biotecnológico.

Por último, aunque las diferencias en cuanto al régimen óptimo no han sido muy marcadas en algunos casos considerados, ello no es óbice para introducir la idea de que las duraciones de los distintos ciclos no tienen por qué ser siempre iguales, y el número de rebrotes considerados debe permanecer invariable, con independencia de los valores que tomen ciertos parámetros que afectan a esta secuencia óptima.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Luiz Carlos Estraviz Rodríguez contó con una dotación del Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) de Brasil. El trabajo de Luis Díaz-Balteiro fue financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT).

REFERENCIAS

- ABRAF (2006) *Anuário estatístico da ABRAF, ano base 2005*. Brasília, Brasil. 80pp.
- Ask P, Carlsson M (2000) Nature conservation and timber production in areas with fragmented ownership patterns. *Forest Pol. Econ. 1*: 209-223.
- Bateman IJ, Lovett AA (2000) Modelling and valuing carbon sequestration in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils. *J. Env. Manag. 60*: 301-323.
- Borges JG, Hoganson HM (1999) Assessing the impact of management unit design and adjacency constraints on forestwide spatial conditions and timber revenues. *Can. J. For. Res. 29*: 1764-1774.
- Cacho OJ, Hean RL, Wise R (2003) Carbon-accounting methods and reforestation incentives. *Aust. J. Agr. Resour. Ec. 47*: 153-179.
- Carlsson M, Andersson M, Dahlin B, Sallnäs O (1998) Spatial patterns of habitat protection in areas with non-industrial private forestry - hypotheses and implications. *For. Ecol. Manag. 107*: 203-211.
- CEPEA (2006) *Informativo CEPEA - Setor Florestal*. www.cepea.esalq.usp.br/florestal
- Chang SJ (1998) A generalized Faustmann model for the determination of optimal harvest age. *Can. J. For. Res. 28*: 652-659.
- Díaz-Balteiro L, Rodríguez LCE (2006) Optimal rotations on eucalyptus plantations including carbon sequestration - A comparison of results in Brazil and Spain. *For. Ecol. Manag. 229*: 247-258.
- Faustmann M (1849) Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgem. Forst Jagd Zeit. 15*. Reimpreso en Faustmann M (1995) Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *J. Forest Econ. 1*: 7-44.
- Hillier FS, Liebermann GJ (1991) *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill. México. 1096 pp.
- Hoen HF, Solberg B (1994) Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Sci. 40*: 429-451.
- Hoganson HM, Borges JG (1998) Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. *Forest Sci. 44*: 526-538.
- Klemperer D (2001) Incorporating risk into financial analysis of forest management investments. En von Gadow (Ed.) *Risk Analysis in Forest Management*. Kluwer. Dordrecht, Holanda. pp. 149-170.
- Knoke T, Moog M, Plusczyk N (2002) On the effect of volatile stumpage prices on the economic attractiveness of a silvicultural transformation strategy. *Forest Pol. Econ. 2*: 229-240.
- McKenney DW, Yemshanova D, Fox G, Ramlal E (2004) Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada. *Forest Pol. Econ. 6*: 345-358.
- Medema EL, Lyon GW (1985) The determination of financial rotation ages for coppicing tree species. *Forest Sci. 31*: 398-404.
- Paredes G (2001) El sector forestal chileno: trayectoria y desafíos. En Rodríguez LCE (Coord.) *Anais 1º Simp. Ibero-Americano de Gestão e Economia Florestal*. Porto Seguro, Brasil. Serie Técnica IPEF 34. pp. 85-106.
- Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F (2003) *Good Practice Guidance for Land-use, Land-use Change and Forestry*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Kanagawa, Japón. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.htm
- Point Carbon (2006) www.point-carbon.com/
- Ribeiro CAAS, Graça LR (1996) Manejo por talhadia: estabelecimento das idades ótimas de corte. *Rev. Árvore 20*: 29-36.
- Richards KR, Strokes C (2004) A Review of Forest Carbon Sequestration Cost Studies: A Dozen Years of Research. *Clim. Change 63*: 1-48.
- Rodríguez LCE (1999) Defining the optimum sequence of rotations for coppice regimes of eucalyptus. En Chang SJ (Ed) *Proc. Int. Symp. 150 Years to the Faustmann Formula: its consequences for forestry and economics in the past, present and future*. Darmstadt, Alemania. Louisiana State University Agricultural Center. pp. 40-47.
- Romero C (1997) Economía de los recursos ambientales y naturales (2ª ed.). Alianza Economía, Madrid. 214 pp.
- Romero C, Ríos V, Díaz-Balteiro L (1998) Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: theory and applications. *J. Oper. Res. Soc. 49*: 121-131.

- Sánchez-Acosta M, Minetti JM (2001) La extensión y la transparencia de mercados forestales en Argentina. En Rodríguez LCE (Coord.) *Anais 1º Simp. Ibero-Americano Gestão e Economia Florestal*. Porto Seguro, Brasil. Serie Técnica IPEF 34. pp. 46-67.
- Sánchez-Acosta M, Vera L (2005) Situación foresto-industrial de Argentina al 2005 (ejemplo de una cadena forestal). En Rodríguez LCE (Coord.) *Proc. 3rd Iberian American Symp. Forest Management and Economics / 11th Symp. System Analysis in Forest Resources*, Ubatuba, Brasil. Serie Técnica IPEF 35. pp. 23-44.
- Scanavaca LJr, García JN (2004) Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. *Sci. Forest.* 65: 120-129.
- Schnute J (1981) A versatile growth model with statistically stable parameters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 38: 1128-1140.
- Smart JCR, Burgess JC (2000) An environmental economic analysis of willow SRC production. *J. Forest Econ.* 6: 193-225.
- Sobol IM (1994) *A primer for the Monte Carlo Method*. CRC. Boca-Raton, FL, EEUU. 107 pp.
- Tait DE (1986) A dynamic programming solution of financial rotation ages for coppicing tree species. *Can. J. For. Res.* 16: 799-801.
- UNFCCC (1997) Kyoto Protocol to the United Nations Framework on Climate Change. http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/background/items/1351.php
- van Kooten GC, Binkley CS, Delcourt G (1995) Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *Am. J. Agr. Econ.* 77: 365-374.
- van Kooten GC, Krccmar-Nozic E, Stennes B, van Gorkom R (1999) Economics of fossil fuel substitution and wood product sinks when trees are planted to sequester carbon on agricultural lands in western Canada. *Can. J. For. Res.* 29: 1669-1678.
- van Kooten GC, Eagle AJ, Manley J, Smolak T (2004) How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks. *Env. Sci. Policy* 7: 239-251.
- Whittock SP, Greaves BL, Apiolaza LA (2004) A cash flow model to compare coppice and genetically improved seedling options for *Eucalyptus globulus* plantations. *For. Ecol. Manag.* 191: 267-274.