

ROTACIÓN ÓPTIMA EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO AL INCLUIR INGRESOS POR CAPTURA DE CARBONO EN OAXACA, MÉXICO

OPTIMAL TIMBER ROTATION LENGTHS IN EUCALYPTUS PLANTATIONS INCLUDING REVENUES FROM CARBON CAPTURE IN OAXACA, MÉXICO

Eugenio Téllez Mejía¹, Manuel de Jesús González Guillén^{1*}, Héctor Manuel De los Santos Posadas¹, Aurelio Manuel Fierros González¹, Robert J. Lillieholm² y Armando Gómez Guerrero¹

¹ Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. ² School of Forest Resources, University of Maine. 243 Nutting Hall, Orono, ME 04469-5755. USA.

* Autor para correspondencia (manuelg@colpos.mx)

RESUMEN

Para aportar elementos que contribuyan a la toma de decisiones en una empresa forestal, este estudio examina la edad óptima de cosecha (turno o rotación óptima) en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* S. T. Blake) establecidas en el noreste de Oaxaca, México. Se determinó el valor neto presente y la rotación óptima para plantaciones en dos calidades de sitio y para dos escenarios de productos finales: 1) madera para celulosa; y 2) madera para aserrío más madera para celulosa, en ambos casos con y sin ingresos por captura de carbono. Se supusieron los costos de mantenimiento de la plantación con una tasa de descuento (r) de 4.5 %, un costo de establecimiento (Co) de \$ 4123 ha⁻¹, un precio de carbono (pc) de \$ 31 (t CO₂e)⁻¹, un precio de madera sólida de \$ 600 m⁻³ y un precio de madera para celulosa de \$211 m⁻³. Se hizo un análisis de sensibilidad al incrementar r , Co y pc en intervalos de 2 %, \$ 2000 ha⁻¹ y \$ 21 (t CO₂e)⁻¹, respectivamente. Las edades óptimas de cosecha encontradas con base únicamente en ingresos por venta de madera varían de 83 a 108 meses en el escenario 1, y de 108 a 163 meses en el escenario 2, según la especie y el índice de sitio. Al incorporar los beneficios por captura de carbono se obtuvo una extensión de la rotación. La edad óptima de cosecha se prolonga de 12 a 20 meses y de 17 a 30 meses para los dos escenarios, respectivamente. Los beneficios por captura de carbono incrementan el valor neto presente de la cosecha al extender la rotación al igual que la relación beneficio-costeo, aunque los cambios en esta última son mínimos.

Palabras clave: *Eucalyptus* spp, rentabilidad financiera, edad óptima de cosecha, valor neto presente.

SUMMARY

We examined the effect of a carbon sequestration market on optimal economic rotation lengths for *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *E. urophylla* S. T. Blake plantations in northeastern Oaxaca, México. Net present value and optimal rotation length were both determined with and without carbon sequestration revenues for stands under two site indices and two product scenarios: 1) pulpwood; and 2) sawlogs and pulpwood. Using a discount rate (r) of 4.5 %, we considered plantation establishment costs (Co) of \$ 4123 ha⁻¹, a carbon price (cp) of \$ 31 (t CO₂e)⁻¹, a sawtimber price of \$ 600 m⁻³, and a pulpwood price of \$ 211 m⁻³. A subsequent sensitivity analysis

examined the effect of increasing the value of r , Co and cp in intervals of 2%, \$ 2000 ha⁻¹ and \$ 21 (t CO₂e)⁻¹, respectively. Optimal harvest ages considering timber revenues only, varied from 83 to 108 months under scenario 1, and from 108 to 163 months under scenario 2, depending on species and site index. When revenues from carbon sequestration are considered, optimal rotation lengths are extended 12 to 20 months under scenario 1, and 17 to 30 months under scenario 2. The addition of a carbon market increases net present value and benefit-cost ratio under the extended rotations, although profitability is insignificant in the last criterion.

Index words: *Eucalyptus* spp, financial maturity, net present value, optimal harvest age.

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales comerciales son proyectos de forestación para producción de madera, celulósicos y otros productos, mediante los cuales el Gobierno Federal de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), impulsa desde hace una década la inversión productiva y el desarrollo del sector, para producir materia prima forestal, generar empleos e impulsar una industria competitiva (Universidad Veracruzana, 2005).

Si bien estas plantaciones tienen como propósito principal la producción maderable para diferentes usos, cuando no son establecidas en sustitución de bosques o selvas, representan una valiosa contribución ambiental (Monreal y Fierros, 1999), ya que permiten rehabilitar y recuperar la biodiversidad al disminuir la presión sobre el uso de los recursos forestales naturales, además de brindar servicios ambientales de importancia como regulación de caudales, conservación del suelo, mejoramiento del hábitat y captura de CO₂. Respecto a este último servicio ambiental, los proyectos de forestación (entre ellos las plantaciones forestales comerciales) y reforestación son

una alternativa importante para mitigar los problemas asociados con el cambio climático, debido a que los sistemas forestales almacenan grandes cantidades de CO₂ en la vegetación y en el suelo (Brown, 1997; Sedjo, 2001). La importancia de estos sistemas fue reconocida en el Protocolo de Kyoto, en el que los únicos proyectos forestales que califican para el comercio de carbono son los de forestación y reforestación.

La entrada en vigor del Protocolo de Kyoto hace posible que los propietarios de tierras forestadas (en países en desarrollo) que cumplan con ciertos requerimientos puedan percibir ingresos adicionales a la venta de madera derivados de este servicio ambiental (Chidiak *et al.*, 2003), lo que se reflejaría en un incremento en la rentabilidad financiera. De esta forma la captura de carbono ha adquirido un valor monetario debido a que existe un mercado formal e internacional, potencial para el caso de México. Sin embargo, la captura de carbono tiene implicaciones que modifican la toma de decisiones en la producción de madera (Díaz-Balteiro, 2002), ya que el propietario forestal se encuentra ante un caso de producción conjunta (*i.e.*, obtención de varios productos y servicios con los mismos factores de producción).

Una decisión que se ve alterada es la elección de la edad óptima de cosecha (turno o rotación óptima). Diversos autores (Gong y Kriström, 1999; Hoen y Solberg, 1994; Plantinga y Birdsey, 1994; Romero *et al.*, 1998; Van Kooten *et al.*, 1995) han examinado el efecto de la internalización de los beneficios de captura de carbono sobre la rotación óptima de la plantación, con base en formas de pago, precios de carbono y productos finales a obtener, entre otros aspectos. A partir de planteamientos teóricos se han analizado estudios de caso para plantaciones y bosques manejados, como los de Alouze (2001), Caparrós *et al.* (2003), Creedy y Wurzbacher (2000), Stainback y Alavalapati (2002), Stainback y Alavalapati (2005), en los que se ha encontrado que al incorporar los beneficios por captura de carbono resulta económicamente ventajoso prolongar la rotación, y en ciertas condiciones el óptimo económico es no cosechar.

Van Kooten (2000) señaló que las alternativas rentables de secuestro de carbono se encuentran en plantaciones con especies de rápido crecimiento, pero son escasos los estudios donde se analiza la edad de cosecha en plantaciones con especies tropicales como el eucalipto (*Eucalyptus* spp). En México no se cuenta con información al respecto, por lo que el presente estudio tiene como objetivo analizar la edad óptima de cosecha en la obtención de productos maderables (celulósicos y de aserrío) al considerar ingresos por el servicio de captura de carbono en plantaciones comerciales de eucalipto (*Eucalyptus urophy-*

lla y *E. grandis*) establecidas en el noreste de Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se hizo en plantaciones forestales comerciales de especies de eucalipto pertenecientes a la empresa Plantaciones de Tehuantepec, S. A. de C. V. (PLAN-TEH). La empresa contempla plantar una superficie de 20 624 ha y ha contratado tierras por un periodo de 30 años, a partir de 1997. A finales de 2003 las plantaciones sumaban 1717 ha, de las cuales 53 % (910 ha) son de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y 47 % (807 ha) de *E. urophylla* S. T. Blake. Estas especies se distribuyen en 13 predios en los Estados de Veracruz y Oaxaca, con edades que fluctúan entre 7 y 73 meses.

Un inventario general de los predios plantados y un estudio de biomasa y carbono en el área de estudio (Gómez-Tejero *et al.*, 2007), se tomaron como base para desarrollar este trabajo, el cual consistió en predicción del rendimiento, estimación del carbono capturado, estimación de beneficios por venta de madera y captura de carbono y determinación de la edad óptima de cosecha.

Predicción del rendimiento

Inicialmente se obtuvo un sistema de rendimiento explícito el cual permite dividir el volumen total en diversas proporciones de productos maderables mediante ecuaciones para cada dimensión de la plantación: crecimiento en altura, área basal, diámetro cuadrático y volumen total (Ecs. 1 a 4). Tales ecuaciones se aplicaron a datos provenientes de parcelas permanentes, establecidas recientemente y con un solo periodo de medición, con intervalo de edades de 20 a 78 meses.

$$H = \frac{\beta_0}{1 - \exp^{\beta_1 + (\beta_{11} \cdot Sp) \cdot \exp^{-(\beta_2 + (\beta_{22} \cdot Sp)) \cdot \text{Log}(t)}}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$B = \gamma_0 \cdot \exp\left(\frac{-\gamma_1}{t}\right) \cdot \exp\left(\frac{\gamma_2 \cdot H}{t} + \frac{\gamma_3 \cdot N}{t}\right) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$D = \delta_0 \cdot H^{\delta_1} \exp\left(\frac{-\delta_2}{t}\right) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$V = \phi_0 \cdot B^{\phi_1} H^{\phi_2} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: *H* = altura dominante de los árboles en m; *Sp* = variable dual 0 para *E. grandis* y 1 para *E. urophylla*; *B* = área basal en m²; *D* = diámetro cuadrático, en cm; *t* = edad del arbolado en meses; *N* = número de árboles por hectárea; *V* = volumen total de fustes (con corteza) en m³ ha⁻¹; (β₀, β₁, β₁₁, β₂, β₂₂), (δ₀, δ₁, δ₂), (γ₀,

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$), $(\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2)$, son los parámetros estimados (Cuadro 1); exp = base de los logaritmos neperianos ($e = 2.718$); log = logaritmo base 10.

Cuadro 1. Parámetros estimados a través de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y bondad de ajuste.

Parámetro	Valor estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de rechazo
β_0	37.23	10.81	3.44	<0.01
β_1	8.66	2.31	3.75	<0.01
β_{11}	-5.05	2.01	-2.51	<0.02
β_2	2.36	0.79	2.98	<0.01
β_{22}	-1.38	0.55	-2.52	<0.02
γ_0	18.35	1.69	10.84	<0.01
γ_1	102.30	7.60	13.46	<0.01
γ_2	2.43	0.17	14.24	<0.01
γ_3	0.03	0.01	5.31	<0.01
δ_0	2.51	0.38	6.57	<0.01
δ_1	0.61	0.04	14.88	<0.01
δ_2	11.32	2.02	5.61	<0.01
φ_0	0.84	0.04	23.70	<0.01
φ_1	1.09	0.01	99.94	<0.01
φ_2	0.71	0.02	40.74	<0.01
θ_1	-0.29	0.04	-8.02	<0.01
θ_2	1.21	0.19	6.38	<0.01
θ_3	-0.46	0.04	-10.59	<0.01
θ_4	-0.28	0.06	-4.83	<0.01
θ_5	6.08	0.18	34.83	<0.01

Para predecir el volumen total de las plantaciones a diferentes calidades de sitio se utilizó la siguiente ecuación de desarrollo en altura:

$$H = IS \cdot \frac{1 - \exp^{\beta_1 + (\beta_{11} \cdot Sp)} \cdot t_b^{-\beta_2 + (\beta_{22} \cdot Sp)}}{1 - \exp^{\beta_1 + (\beta_{11} \cdot Sp)} \cdot t_d^{-\beta_2 + (\beta_{22} \cdot Sp)}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: IS = índice de sitio de la plantación expresado en altura del arbolado en metros a una edad de referencia; t_b = edad de referencia o edad base; t_d = edad a la cual se hace la predicción de altura en meses.

A través de la Ec. 5 se proyectó el desarrollo en altura para dos calidades de sitio ($IS\ 24$ e $IS\ 28$) a una edad base de 60 meses. Se supuso que de las plantaciones pueden obtenerse dos productos finales: madera para celulosa y madera sólida (aserrío), por lo que se estimó el volumen comercial de cada tipo de producto a partir del volumen total (Ec. 4) mediante el ajuste del modelo no lineal propuesto por Amateis *et al.* (1986). La ecuación ajustada es:

$$V_{h,i} = V \cdot e^{\left(\theta_1 \left(\frac{i}{D} \right)^{\theta_2} + \theta_3 \cdot IB^{\theta_4} \cdot \left[\frac{h}{D} \right]^{\theta_5} \right)} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde: $V_{h,i}$ = volumen de madera comercial en $m^3\ ha^{-1}$ de árboles con diámetro normal (D_{bh}) iguales o mayores a “ h ” centímetros y con diámetro de punta (tope) superior a “ i ” centímetros; IB = inverso del área basal; D = diámetro cuadrático, en cm (Ec. 3); $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$, son parámetros estimados (Cuadro 1).

La Ec. 6 originalmente consideraba el número de árboles por hectárea (N) a diferentes edades, pero como no se contó con datos para el ajuste de un modelo para simular la mortalidad, este término fue sustituido por el inverso del área basal (IB), ya que presenta un comportamiento similar al de la mortalidad. De esta manera pudo ajustarse la ecuación propuesta.

Para obtener el volumen de madera para celulosa (celulósicos) se usaron diámetros normales y de punta con $h = 14$ cm e $i = 8$ cm; para el volumen de madera sólida para aserrío se emplearon diámetros con $h = 25$ cm e $i = 15$ cm. Los valores de $h = 14$ e $i = 8$ se consideraron como los diámetros mínimos comerciales, y por tanto el volumen estimado representa el volumen total de madera comercial. Al sustituir los valores de h e i en la Ec. 6, el volumen comercial por producto se estimó como:

$$V_{cel} = V_{14,8} = V \cdot e^{\left(\theta_1 \left(\frac{8}{D} \right)^{\theta_2} + \theta_3 \cdot IB^{\theta_4} \cdot \left[\frac{14}{D} \right]^{\theta_5} \right)} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$V_{as} = V_{25,15} = V \cdot e^{\left(\theta_1 \left(\frac{15}{D} \right)^{\theta_2} + \theta_3 \cdot IB^{\theta_4} \cdot \left[\frac{25}{D} \right]^{\theta_5} \right)} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde V_{cel} = volumen de madera con dimensiones comerciales para celulosa, y V_{as} = volumen de madera comercial con diámetros para madera de aserrío.

A partir de lo anterior se definieron dos escenarios de productos finales: 1) madera para celulosa (todo el volumen comercial para celulosa); y 2) madera para aserrío y madera para celulosa. Para este último, se supone que una parte del volumen total de madera comercial tiene dimensiones para ser vendido como trocería para aserrío a un precio superior, y el resto se vende como madera para celulosa. Consecuentemente, el volumen de madera para celulosa empleado se estimó al restar el volumen de madera de aserrío del volumen total comercial; esto es:

$$V_{ce2} = V_{cel} - V_{as} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde V_{ce2} = volumen de madera para celulosa bajo el escenario de separación de productos.

Estimación de carbono capturado

El carbono acumulado (capturado) por hectárea se estimó en función del rendimiento volumétrico a través de la cantidad de carbono existente (C) por cada m³ de madera. Se consideró la densidad de la madera y el contenido de carbono en biomasa estimados con el procedimiento de Smith (1954) para las mismas plantaciones, como se indica en el Cuadro 2.

La cantidad de CO₂ equivalente (CO₂e) del Cuadro 2 sólo incluye el carbono contenido en la biomasa de fuste. El carbono contenido en las ramas y el follaje se estimó a través de factores de conversión de biomasa aérea total a partir de la biomasa del fuste. La proporción de biomasa de fuste respecto al área total encontrada para *Eucalyptus grandis* fue de 88 % y para *E. urophylla* de 85 % (Smith, 1954); por tanto, los factores de conversión correspondientes para cada especie son: 100/88 = 1.136 y 100/85 = 1.176. De esta forma, la cantidad de CO₂e total aéreo por cada m³ de madera es de 0.919 y 0.931 toneladas para *E. grandis* y *E. urophylla*, respectivamente.

Cuadro 2. Densidad de la madera, contenido de carbono en biomasa del fuste y proporción carbono-volumen en el fuste estimados para ambas especies plantadas con el procedimiento de Smith (1954).

Variable	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>
Densidad (t m ⁻³)	0.460	0.450
Contenido de carbono en biomasa (% en forma decimal)	0.48	0.48
Proporción carbono-volumen (tC m ⁻³)	0.460 x 0.48 = 0.220	0.450 x 0.48 = 0.216
Proporción CO ₂ e ^{††} volumen (tCO ₂ e m ⁻³) [†]	0.2208 x (44/12) [‡] = 0.809	0.216 x (44/12) [‡] = 0.792

[†] Toneladas de CO₂e m⁻³ de madera.

^{††} CO₂ equivalente

[‡] 44 corresponde al peso molecular de CO₂ y 12 al peso molecular de C.

Estimación de beneficios por venta de madera y captura de carbono

Se calculó el valor neto presente (VNP) asociado a la plantación, al considerar beneficios por venta de madera y captura de carbono a diferentes edades de la plantación, a través de la propuesta de Romero *et al.* (1998). En las condiciones de producción de las plantaciones estudiadas, la expresión del VNP es:

$$VNP = \frac{PVC + PVf - Ad \cdot \delta - Cm \cdot \delta - R \cdot \delta - Pr \cdot \exp^{-rT} - M \cdot \exp^{-rT}}{1 - \exp^{-rT}} + S_{PRODEPLAN} \tag{Ec. 10}$$

Donde: PVC = valor de los beneficios por captura de carbono; PVf = valor por venta de la madera; Ad = costos de administración; Cm = costos de mantenimiento de caminos; R = renta de la tierra; Pr = costos por protección de la plantación; M = costos de mantenimiento de la plantación; $S_{PRODEPLAN}$ = subsidio para gastos de reforestación. Todos los términos anteriores se expresan en pesos mexicanos por hectárea (\$ ha⁻¹); T = edad de rotación en meses; r = tasa de descuento, 4.5 % (forma decimal: 0.045); δ = factor de descuento para anualidades. Este último se expresa como:

$$\delta = \frac{\exp^{-r \cdot 1} \cdot (\exp^{-r \cdot T} - 1)}{(\exp^{-r \cdot 1} - 1)} = \sum_{t=1}^T \exp^{-r \cdot t}; t = 12, 24, 36, 48 \dots T \text{ meses.} \tag{Ec. 11}$$

La variable $S_{PRODEPLAN}$ corresponde al apoyo para el establecimiento y mantenimiento otorgado por la CONAFOR a través del Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN). El monto del apoyo fue de \$ 6 000 ha⁻¹.

La elección de una tasa de descuento (r) de 4.5 % y el incremento de la misma en el análisis de sensibilidad se basó en lo mencionado por Muñante (Com. personal)¹ quien indica que el Banco de México, al inicio de una administración divulga como referencia las r 's que deben utilizarse en proyectos forestales. En el periodo anterior, se estimó que la r puede oscilar entre 4.5 % y 7 %, según la especie en evaluación (de rápido o lento crecimiento). Además, Bilek (1996)² indica que a nivel internacional, la r varía entre 3 y 9 %, donde la r más alta corresponde a plantaciones forestales de rotaciones cortas y viceversa.

La Ec. 10 corresponde a una modificación a la fórmula del valor esperado del suelo (VES) de Faustmann (1849), e indica el VNP de una serie infinita de turnos. El monto de los costos necesarios para calcular el VNP se especifica en el Cuadro 3.

El valor de los beneficios por captura de carbono (PVC) se estimaron con el planteamiento de Van Kooten

¹ Muñante P D (2006) Profesor de la materia de formulación y evaluación de proyectos productivos. División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA), Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

² Bilek T (1996) Rate of return in forestry. www.metla.fi/archive/forest/1996/03/msg00047.html. (actualizado a Enero 2008).

et al. (1995) y la modificación del mismo realizada por Stainback y Alavalapati (2002), ésta es:

$$PVc = pc \cdot \alpha_{sp} \left[V(T) \cdot \exp^{-rT} + r \cdot \int_0^T V(t) \cdot \exp^{-rt} dt \right] - dec_{ce} - dec_{as} \tag{Ec. 12}$$

$$dec_{as} = pc \cdot \alpha_{sp} \cdot (1 - \beta_{as}) \cdot V_{as}(T) \cdot \exp^{-rT} \tag{Ec. 13}$$

$$dec_{cen} = pc \cdot \alpha_{sp} \cdot (1 - \beta_{ce}) \cdot V_{cen}(T) \cdot \exp^{-rT} \tag{Ec. 14}$$

Donde: α_{sp} = constante que expresa la proporción de CO₂e por m³ de madera, 0.919 y 0.931 t CO₂e m⁻³ para *E. grandis* y *E. urophylla*, respectivamente; $V(T)$ = volumen total del fuste al final de horizonte de planeación T (estimado con la Ec. 4) y $V(t)$ = función genérica de volumen a cualquier edad t , en m³ ha⁻¹; $V_{as}(T)$ = volumen de madera sólida (aserrío) al final del horizonte de planeación T obtenido con la Ec. 8; $V_{cen}(T)$ = volumen de madera para celulosa estimado con las Ecs. 7 y 9 (V_{cel} o V_{ce2}), según el escenario de productos finales; dec_{cen} = valor neto presente de la emisión de carbono por descomposición de madera para celulosa cosechada, \$ ha⁻¹; dec_{cas} = valor presente de la emisión de carbono por descomposición del volumen de madera sólida cosechada, \$ ha⁻¹; β_{ce} = proporción de volumen de madera para celulosa cosechada que permanece en estructuras por largo tiempo, 30 % (forma decimal 0.3); β_{as} = proporción de volumen de madera sólida cosechada que permanece en estructuras por largo tiempo, 60 % (forma decimal 0.6); estos valores han sido utilizados en estudios previos como Enzinger y Jeffs (2000); pc = precio de carbono, \$ 31 por tonelada de CO₂ equivalente, \$ (t CO₂e)⁻¹, el cual corresponde al menor precio de mercado esperado para el periodo 2005-2007 determinado por el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS) (DTI, 2005).

El valor presente de los beneficios por venta de madera de los dos productos finales se obtuvo a través de la siguiente expresión:

$$PVf = (p_{as} \cdot V_{as}(T) + p_{ce} \cdot V_{cen}(T)) \cdot e^{-rT} - Co \tag{Ec. 15}$$

Donde: p_{as} = precio de madera sólida, \$ 600 m⁻³; p_{ce} = precio de madera para celulosa, \$ 211 m⁻³; Co = costo de establecimiento (producción de planta, preparación de sitio y plantación), \$ 4123 ha⁻¹.

Los precios corresponden a madera sólida en pie; es decir, sin considerar los costos de cosecha (corte, arrime y carga) y transporte. El precio de madera para aserrío es

una estimación del precio de venta propuesto por la Gerencia de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN) de la CONAFOR, ya que la empresa no ha negociado la comercialización de este producto por lo joven de las plantaciones. El precio de la madera para celulosa fue proporcionado por la Gerencia Forestal de la empresa PLANTEH y representa el precio al que se vendió la madera de las primeras hectáreas cosechadas en marzo del 2006.

Cuadro 3. Esquema de egresos a través en un horizonte de planeación de 15 años.

Concepto	Costos en \$ ha ⁻¹				
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4 [†] -15
Planeación	135				
Producción de planta		923			
Preparación del sitio		2098			
Plantación		1103			
Mantenimiento		1559	1559		
Protección de la plantación		643	643	643	†
Mantenimiento caminos		43	43	43	†
Fertilización		935			
Administración			1588	1588	†
Renta de la tierra			384	384	†

† Del año 4 al 15 se tienen las mismas actividades del año 3; por ello a partir de éste, los costos anuales son iguales a los del año 3.

Determinación de la edad óptima de cosecha

La determinación de la edad óptima de cosecha se hizo mediante el criterio de equimarginalidad; es decir, cuando el beneficio marginal (BM) y costo marginal (CM) asociados a la decisión de cosecha son iguales. Estas expresiones se presentan de acuerdo a los escenarios de productos finales:

Madera sólo para celulosa y carbono

$$BM = (p_{ce} \cdot V'_{ce1}(T)) + (pc \cdot \alpha_{sp} \cdot V'(T)) + r \cdot (dec_{cen}) \tag{Ec. 16}$$

$$CM = r \cdot (p_{ce} \cdot V_{ce1}(T)) + r \cdot (VNP) \tag{Ec. 17}$$

Madera para aserrío, madera para celulosa y carbono

$$BM = (p_{ce} \cdot V'_{ce2}(T) + p_{as} \cdot V'_{as}(T)) + (pc \cdot \alpha_{sp} \cdot V'(T)) + r \cdot (dec_{cen} + dec_{as}) \tag{Ec. 18}$$

$$CM = r \cdot (p_{ce} \cdot V_{ce2}(T) + p_{as} \cdot V_{as}(T)) + r \cdot (VNP) \tag{Ec. 19}$$

Donde: $V'(T)$ = incremento marginal del volumen total de la plantación; $V'_{ce1}(T)$, $V'_{ce2}(T)$ = incrementos marginales del volumen para celulosa, según el escenario de productos finales; $V'_{as}(T)$ = incremento marginal del

volumen de madera sólida, todos expresados en $m^3 ha^{-1}$ año.

En ambos escenarios el *BM* lo componen los ingresos adicionales por venta de madera y por captura de carbono dado el crecimiento marginal del arbolado al posponer la cosecha; asimismo al posponer ésta se evita la penalización por la reemisión de carbono a la atmósfera al cosechar, lo que representa un beneficio por los intereses del valor de las emisiones (*dec_{cen}* y *dec_{cas}*). Al posponer la cosecha el propietario forestal asume un *CM* por renunciar al rendimiento financiero que podría obtener con la cosecha (ingresos por venta de madera y captura de carbono), y considera el costo de oportunidad del terreno por mantenerlo ocupado para futuras rotaciones a través del término *r* (*VNP*).

La estimación del valor neto presente (*VNP*) y la determinación de la edad óptima de cosecha se hizo para

un escenario base en que $r = 4.5 \%$, $Co = \$ 4123 ha^{-1}$, y $pc = \$ 31 (t CO_2e)^{-1}$.

Con el propósito de identificar el efecto de estas variables relevantes sobre la edad óptima de rotación, se hizo un análisis de sensibilidad al incrementar el valor de éstas en intervalos de 2 %, \$ 2000 ha^{-1} y \$ 21 ($t CO_2e$)⁻¹, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento del rendimiento de volumen comercial separado en productos finales (Ecs. 4 y 6) para dos calidades de sitio y ambas especies, se muestra en la Figura 1. La ecuación de volumen comercial propuesta por Amateis *et al.* (1986) se adecúa perfectamente a los datos empleados (ver parámetros estimados y bondad de ajuste en el Cuadro 1) y a la condición del estudio - plantaciones no aclareadas pero con cierta mortalidad a través del tiempo.

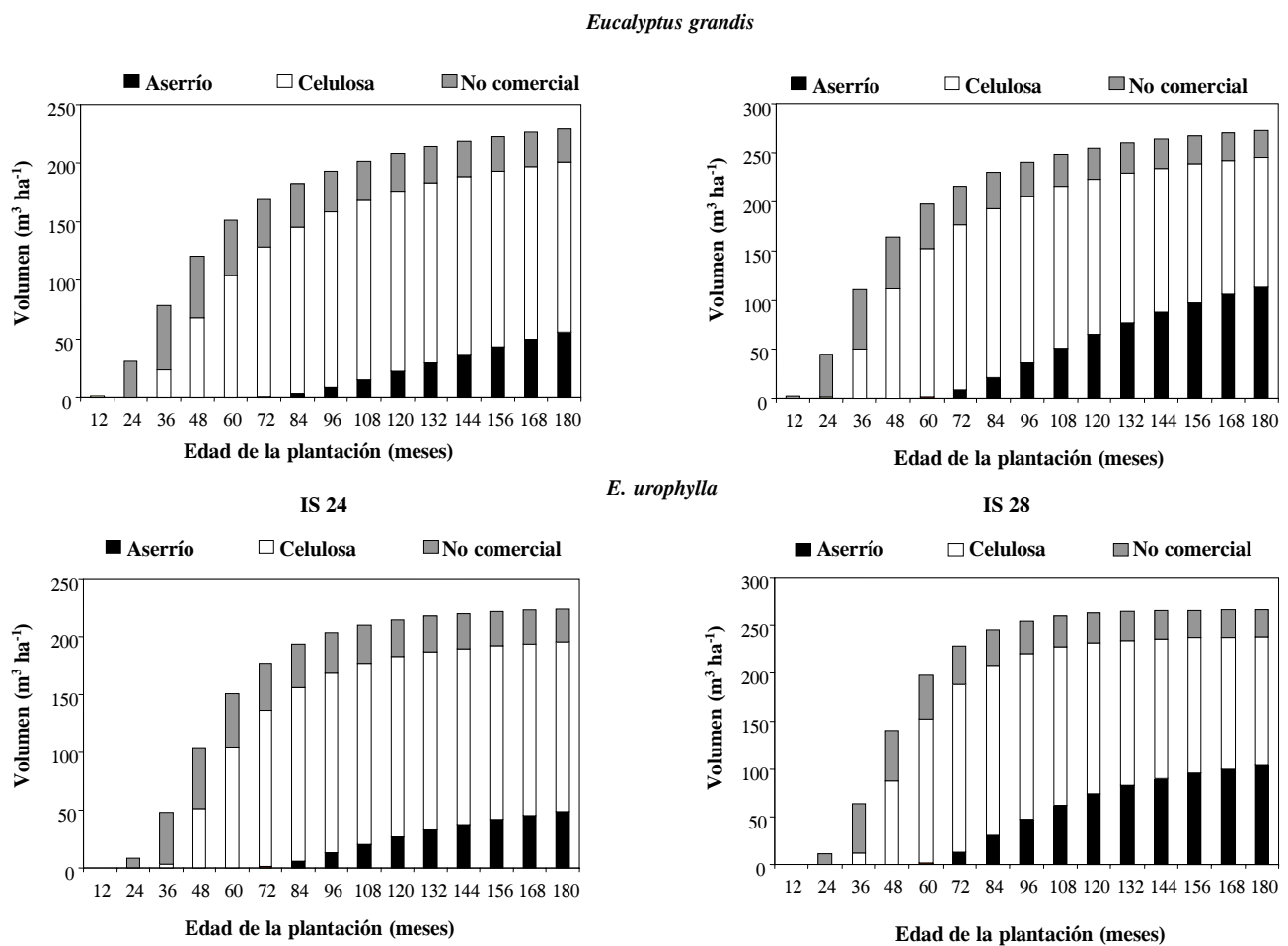


Figura 1. Separación del volumen total en: comercial por productos y no comercial para plantaciones no aclareadas de *E. grandis* y *E. urophylla*, con índices de sitio (IS) 24 y 28 m.

Esta ecuación puede ser empleada para estimar rendimientos maderables a diferentes diámetros comerciales porque produce resultados consistentes como los observados aquí y en otros trabajos, entre ellos el de Pienaar y Rheney (1995).

El rendimiento se afectó considerablemente por la calidad de sitio, con una diferencia hasta de 50 m³ ha⁻¹ entre los índices de sitio determinados (Figura 1). En plantaciones con mayor crecimiento (IS 28) el volumen de madera sólida comienza a sobresalir antes de 96 meses, con una proporción de madera sólida (40 % del volumen comercial) casi comparable al volumen de madera para celulosa al final del periodo de simulación, mientras que en plantaciones con crecimiento regular (IS 24) la madera sólida llega a representar sólo 20 % del volumen comercial total. La situación anterior ocurre en forma similar para ambas especies. Las diferencias encontradas entre índices de sitio (IS) y especies en el rendimiento maderable afectan, sin duda, la edad óptima de cosecha (económicamente más ventajosa), ya que la magnitud de los beneficios tanto maderables como por captura de carbono, dependen de la productividad de las plantaciones.

Las plantaciones con mayor crecimiento (IS 28) no sólo pueden ser cosechadas antes que las plantaciones que crecen en calidades de sitio menores (IS 24) sino que el valor neto presente (VNP) de la cosecha es mayor (Figuras 2 y 3). Stainback y Alavalapati (2005) encontraron que bajo un manejo más intensivo, las plantaciones de *Pinus ellioti* presentaron tasas de crecimiento más altas y un óptimo económico en rotaciones más cortas, lo que genera un flujo de efectivo rápido y poco afectado por la tasa de descuento. Una situación similar se presenta en estas plantaciones, sólo que en este caso el incremento de las tasas de crecimiento se debe a la diferencia de la calidad de sitio. Las diferencias en el VNP y las edades óptimas de cosecha entre plantaciones con distinta calidad de sitio son más notorias para el escenario de separación de productos (Figuras 2 y 3).

Cuando se divide el volumen comercial de una plantación en varios productos según sus dimensiones (madera sólida y madera para celulosa), los resultados indican que la edad de cosecha debe ser mayor que la edad de cosecha de plantaciones donde se considera todo el volumen comercial para celulosa. El tener una parte del volumen comercial con mayor valor (madera sólida) incrementa el costo y beneficio marginal (CM y BM) asociados con la decisión de cosecha, y el óptimo se ubica a edades mayores que para el escenario donde todo el volumen comercial se vende como madera para celulosa (Figura 4). Bajo el escenario de separación de productos, una mejor calidad de sitio como IS 28 representa rendimientos totales más

altos; adicionalmente, el volumen de madera sólida comienza a ser relevante a más temprana edad, y consecuentemente se tienen cosechas más rentables y edades óptimas de rotación notoriamente más cortas que en las plantaciones con IS 24.

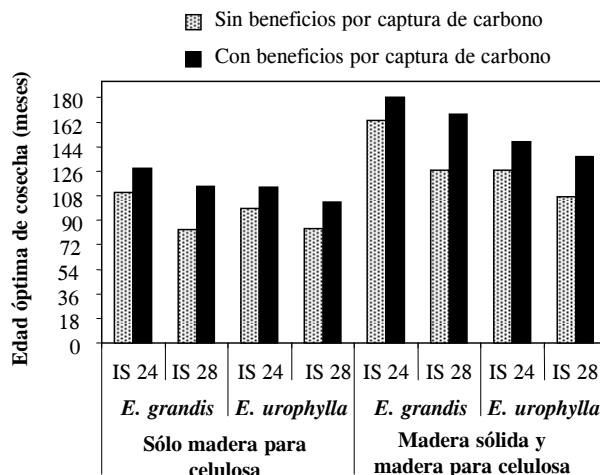


Figura 2. Edad óptima de cosecha en plantaciones de *E. grandis* y *E. urophylla* para dos índices de sitio, dos escenarios de productos finales, con y sin beneficios por captura de carbono.

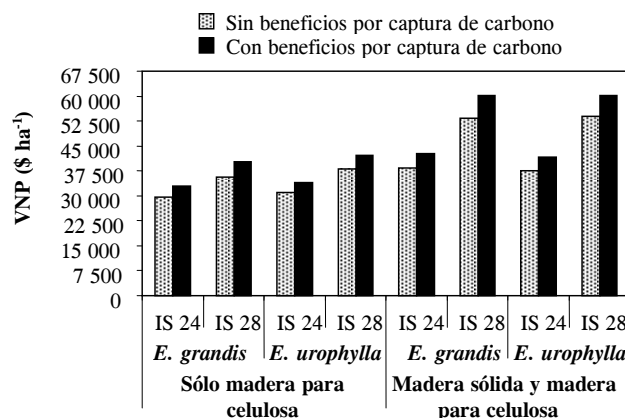


Figura 3. Valor neto presente (VNP) en la edad óptima de rotación en plantaciones de *E. grandis* y *E. urophylla* para dos índices de sitio y escenarios de productos finales, con y sin beneficios por captura de carbono.

Al incorporar los beneficios por captura de carbono se distingue un incremento evidente en la longitud de la rotación respecto a la edad de referencia (sólo beneficios por venta de madera) en los dos escenarios de productos finales. Lo anterior indica consistencia con resultados de otros trabajos, por ejemplo Caparrós *et al.* (2003), Stainback y Alavalapati (2002), Stainback y Alavalapati (2005), y Van Kooten *et al.* (1995).

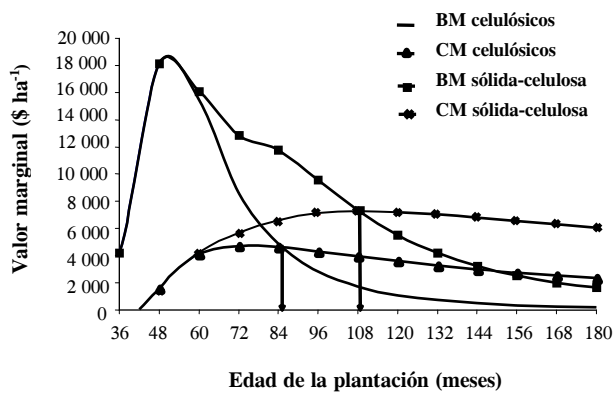


Figura 4. Beneficio (BM) y costo marginal (CM) por posponer la cosecha a diferentes edades de la plantación de *E. urophylla* con IS 28 m, para los escenarios de celulósicos y madera-sólida.

La postergación de la cosecha proporciona mayores beneficios a la sociedad, ya que más carbono se acumula en el arbolado y se retarda su reemisión al cosechar la madera. Los esquemas de pago, además de promover la captura de carbono en compensación por emisiones de CO₂, tienen este propósito; es decir, los beneficios por captura de carbono buscan un mayor bienestar social mediante la extensión de la rotación al promover que las plantaciones se destinen a productos finales de larga vida. Desde la perspectiva del propietario forestal, el prolongar la rotación debe ir acompañado de un beneficio económico que compense la pérdida de eficiencia por no cosechar en el óptimo determinado exclusivamente por los ingresos por venta de madera. Esta situación se cumple en los casos analizados en este trabajo; es decir, si bien al incorporar los beneficios por captura de carbono la rotación óptima se extiende, también el VNP de la cosecha es mayor para los dos escenarios de productos finales. Sin embargo, cuando se considera la cosecha de madera sólida, es mayor la extensión de la rotación así como el VNP estimado (Figuras 2 y 3). Lo anterior se debe a que se vende un producto a un precio superior y a que se trata de un producto de larga vida en el que permanece por más tiempo el carbono capturado, y por tanto los ingresos netos descontados por captura de carbono estimados por la Ec. 8 son más altos.

A pesar de tener un VNP más alto con los beneficios por captura de carbono, la rentabilidad de la cosecha bajo el precio de carbono asumido en este análisis, $pc = \$ 31 (t CO_2e)^{-1}$, resultó en algunos casos inferior a la rentabilidad cuando no se incorporan dichos beneficios (Figura 5).

La situación anterior se debe a que la diferencia entre costos totales y beneficios es menor conforme la rotación es más larga. Los beneficios por captura de carbono y maderables aumentan durante todo el periodo simulado, al

igual que los costos totales; sin embargo, estos últimos mantienen tasas crecientes todo el tiempo, a diferencia de los beneficios que tienen un periodo con tasas decrecientes, por lo que la diferencia entre costos y beneficios tiende a reducirse a mayor edad de la plantación (Figura 6). En este sentido, si la rotación se prolonga considerablemente al incorporar los ingresos por captura de carbono, los incrementos en los beneficios totales no compensarán en muchos casos el incremento de los costos totales, y se tiene una relación Beneficio-Costo similar e inclusive inferior a aquella cuando sólo se consideran ingresos por venta de madera.

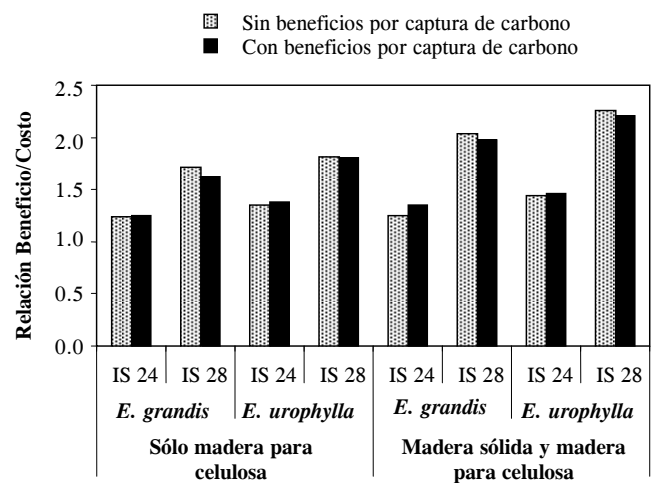


Figura 5. Relación Beneficio/Costo en la edad óptima de rotación en plantaciones de *E. grandis* y *E. urophylla* para dos índices de sitio y escenarios de productos finales con y sin beneficios por captura de Carbono.

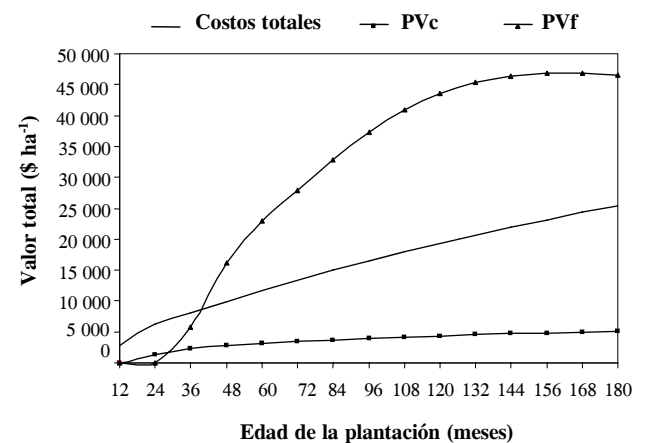


Figura 6. Comportamiento de los costos totales y beneficios por captura de carbono y venta de madera en la plantación de *E. grandis* con IS 28, bajo un escenario de separación de productos (madera sólida-madera para celulosa). PVc = valor de los beneficios por captura de carbono; PVf = valor por venta de madera.

Con relación a la sensibilidad de la edad óptima de cosecha ante el incremento de la tasa de descuento (r), costo de establecimiento (Co) y precio de carbono (pc), el Cuadro 4 muestra el cambio de la edad de rotación, e indica si ésta se acorta o se extiende. En este cuadro se distinguen los siguientes comportamientos: 1) El incremento en el costo de establecimiento de la plantación origina un cambio de magnitud similar en la edad de rotación óptima en ambos escenarios de productos finales; 2) El aumento de la tasa de descuento tiene un mayor impacto sobre la edad de rotación en el escenario madera sólida-celulosa, puesto que el descuento afecta el valor presente de los ingresos derivados de dos productos con precios diferenciados; 3) La edad de rotación es más sensible a cambios en plantaciones de *E. grandis* que en los de *E. urophylla*; 4) El efecto de la edad de cosecha tiene un menor impacto en plantaciones con mejores calidades de sitio (IS 28) que en plantaciones en sitios de menor calidad (IS 24).

Los dos últimos puntos están relacionados con características del rendimiento, ya que plantaciones con rendimientos más altos permiten cosechas más rentables en menos tiempo y serán menos afectadas por cambios en las variables consideradas. Esto explica el hecho de que en plantaciones con *E. grandis* y plantaciones con IS 24 los cambios en la rotación sean de mayor magnitud.

CONCLUSIONES

E. urophylla presenta mayores incrementos de madera para aserrío, por lo que en un escenario de separación de productos se tienen cosechas más rentables a una edad más temprana y las edades óptimas en esta especie son más cortas que para *E. grandis*. Sólo en plantaciones con mejor calidad de sitio (IS 28) el volumen de madera sólida es importante, situación que se refleja no sólo en las edades

óptimas basadas solamente en beneficios maderables, sino también en las edades óptimas de cosecha cuando se incorporan los beneficios por captura de carbono.

La extensión de la rotación al incorporar los beneficios por captura de carbono y el comportamiento de los cambios en la edad óptima de cosecha (rotación óptima) respecto a las variables consideradas son consistentes con los principios teóricos revisados. La edad de cosecha es considerablemente más sensible a los cambios de la tasa de descuento.

La incorporación de beneficios por captura de carbono en estas plantaciones obliga a extender el turno o rotación, lo que resulta en incremento del volumen en biomasa y en la posibilidad de obtener dos productos, madera sólida y madera para celulosa conjuntamente. Con esto, la cantidad de carbono almacenado en la madera permanecerá por más tiempo secuestrado e incrementará el beneficio social. Sin embargo, los beneficios por captura de carbono que obtendría el propietario forestal con el precio de carbono aquí considerado, no mejoran la rentabilidad de estas plantaciones por lo que el comercio de carbono no le resultaría atractivo.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación "Captura de carbono, biodiversidad, productividad y zonificación productiva de plantaciones comerciales en los límites de Oaxaca y Veracruz" del Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT (clave: 2003-CO3-9925), por el financiamiento otorgado; y al Ing. Víctor Sosa Cedillo, Gerente Forestal de Plantaciones de Tehuantepec S. A. de C. V. (PLANTEH) por su apoyo.

Cuadro 4. Cambio (en meses) de la edad de rotación en plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* ante un incremento en las variables tasa de descuento (r), costos de establecimiento (Co), y precios de carbono (pc), para dos índices de sitio y escenarios de productos finales.

Variable	Sólo madera para celulosa				Madera sólida-celulosa				Cambio en la rotación
	<i>E. grandis</i>		<i>E. urophylla</i>		<i>E. grandis</i>		<i>E. urophylla</i>		
	IS 24	IS 28	IS 24	IS 28	IS 24	IS 28	IS 24	IS 28	
Co (Δ \$2 000)	4	2	2	1	3	2	2	1	Se extiende
r (Δ 2 %)	12	5	5	3	19	9	9	5	Se acorta
Pc^\dagger (\$21 (t CO ₂ e) ⁻¹)	4	3	2	2	2	2	2	1	Se extiende
R^\dagger (Δ 2 %)	13	11	8	6	14	12	14	10	Se acorta

[†] Sólo en los escenarios con beneficios por captura de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

- Alouze C M (2001)** The effect of the non-market component of standing value on the optimal forest rotation. Discussion Paper 2001/1. School of Economics, University of New South Wales. Sydney, Australia. 35 p.
- Amateis R L, H E Burkhardt, T E Burk (1986)** A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned loblolly pine plantations. *For. Sci.* 32:287-296.
- Brown S (1997)** Forests and climate change: role of forest lands as carbon sinks. In: Berk H (ed) Forest and tree resources. Proc. XI World Forestry Congress, October 13-22, 1997. Antalya, Turkey 1:117-125.
- Caparrós A, P Campos, D Martín (2003)** Influence of carbon dioxide abatement and recreational services on optimal forest rotation. *Int. J. Susta. Develop.* 6:345-358.
- Chidiak M, A Moreyra, C Greco (2003)** Captura de Carbono y Desarrollo Forestal Sustentable en la Patagonia Argentina: Sinergias y Desafíos. Centro de Investigaciones para la Transformación (CENIT) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Informe final. Buenos Aires, Argentina. 27 p.
- Creedy J, A Wurzbacher (2000)** The economic value of a forested catchment with timber, water and carbon sequestration benefits. Research Paper Number 753. Department of Economics, University of Melbourne. Australia. 27 p.
- Díaz-Balteiro L (2002)** Los Sistemas Forestales y la Provisión de Bienes Ambientales. Jornada Temática "Aspectos Medioambientales de la Agricultura". Libro Blanco de Agricultura. Madrid, España. 12 p.
- DTI (Department of Trade & Industry) (2005)** Carbon Prices. A climate change projects office guide. United Kingdom. 5 p.
- Enzinger S, C Jeffs (2000)** Economics of forests as carbon sinks: An Australian perspective. *J. For. Econ.* 6:227-247.
- Faustmann M (1849)** Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung*, 15.
- Gómez-Tejero J, H M de los Santos-Posadas, A M Fierros-González, J R Valdez-Lazalde (2007)** Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en María Lombardo, Oaxaca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* En revisión.
- Gong P, B Kriström (1999)** Regulating forest rotation to increase CO₂ sequestration. Sveriges antbruksuniversitet, Institutionen för skogsekonomi. Arbetsrapport 272:1-24.
- Hoen H F, B Solberg (1994)** Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *For. Sci.* 40:429-451.
- Monreal S B, A M Fierros (1999)** Beneficios Ambientales, Económicos y Sociales de las Plantaciones Forestales Comerciales, Subsidadas por el PRODEPLAN. Dirección General de Estadística e Información Ambiental (DGEIA). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. 18 p.
- Pienaar L V, J W Rheney (1995)** Modeling stand level growth and yield response to silvicultural treatments. *For. Sci.* 41:629-638.
- Plantinga A J, R A Birdsey (1994)** Optimal forest stand management when benefits are derived from carbon. *Nat. Res. Model.* 8:373-387.
- Romero C, V Ríos, L Díaz-Balteiro (1998)** Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: theory and applications. *J. Operat. Res. Soc.* 49:121-131.
- Sedjo R (2001)** Forest Carbon Sequestration: Some Issues for Forest Investments. Resources for the Future, Discussion Paper 01-34. Resources for the Future Organization. Washington DC. U.S. 26 p.
- Smith D M (1954)** Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. U. S. Forest Service. Forest Products Laboratory. Report 2014. Wisconsin, USA. 8 p.
- Stainback G A, J R R Alavalapati (2002)** Economic analysis of slash pine forest carbon sequestration in the southern U. S. *J. For. Econ.* 8:105-117.
- Stainback G A, J R R Alavalapati (2005)** Effects of carbon markets on the optimal management of slash pine *Pinus elliotii*. *South. J. Appl. For.* 29:27-32.
- Universidad Veracruzana (2005)** Evaluación Externa del Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRO-DEPLAN), ejercicio fiscal 2004. Informe final. Sistema Nacional de Información Forestal. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 157 p.
- Van Kooten G C, C S Binkley, G Delcourt (1995)** Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *Amer. J. Agric. Econ.* 77:365-374.
- Van Kooten G C (2000)** Economic dynamics of tree planting for carbon uptake on marginal agricultural lands. *Can. J. Agric. Econ.* 48:51-65.