

Optimum cutting ages in hybrid poplar plantations including carbon sequestration: A case study in Turkey

Edades óptimas de corte en bosques de álamos híbridos incluyendo captación de carbono: Un estudio de caso en Turquía

Sedat Keleş

Çankırı Karatekin University, Faculty of Forestry, 18100, Çankırı-Turkey.
sedatkeles@karatekin.edu.tr Tel.: +90 554 528 29 86 Fax: +90 376 213 69 83

Abstract

Determining optimum cutting ages including various forest ecosystem values together with wood production is extremely important in forestry now. This study presents the optimum cutting ages in hybrid poplar plantations (*Populus x euramericana* [Dode] Guinier cv. I-214) including timber production and carbon sequestration values in Turkey. It also evaluates the effects of different discount rates and carbon prices on the optimum cutting ages using net present value approach. The growth and yield curves and biomass/carbon conversion factors for hybrid poplar plantations with forest plantation costs are used to determine the optimum cutting ages. Results of the case study showed that the integration of carbon sequestration benefits into wood benefits increased the optimum cutting ages of hybrid poplar plantations. Optimum cutting ages decreased from 19 to 14 years depending on the increase in discount rates. When carbon prices increased, the optimum cutting ages also increased from 17 to 20 years. In the presence of carbon sequestration benefits, increasing the optimum cutting age yields net economic benefits of 374 to 1,654 US\$·ha⁻¹. Total net present values obtained from wood production and carbon sequestration benefits increased between 6 and 26 % depending on the increase in carbon prices (from 0 to 40 US\$·t⁻¹ carbon).

Keywords: Cutting age, forest management, climate change, net present value, carbon sequestration.

Resumen

En la actualidad, la determinación de las edades óptimas de corte, incluyendo diversos valores de ecosistemas forestales junto con la producción de madera, es extremadamente importante en la silvicultura. Este estudio presenta las edades óptimas de corte en *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. I-214, incluyendo la producción de madera y los valores de captura de carbono en Turquía. También se evalúan los efectos de las tasas de descuento y precios del carbono en las edades óptimas de corte, utilizando el método del valor actual neto. Las curvas de crecimiento y rendimiento y los factores de conversión de carbono/biomasa con costos de plantación forestales se utilizaron para determinar las edades óptimas de corte. Los resultados del estudio de caso mostraron que la integración de los beneficios de captura de carbono con los beneficios de la madera incrementó las edades óptimas de corte de los bosques de álamo híbrido. Las edades óptimas de corte descendieron de 19 a 14 años, dependiendo del aumento en las tasas de descuento. Cuando los precios de carbono aumentaron, las edades óptimas de corte también aumentaron de 17 a 20 años. En presencia de los beneficios de captura de carbono, el aumento de las edades óptimas de corte produjo beneficios económicos netos de 374 a 1,654 USD·ha⁻¹. Los valores actuales netos totales, obtenidos de la producción de madera y beneficios de captura de carbono, aumentaron entre 6 y 26 %, dependiendo del aumento de los precios del carbono (de 0 a 40 USD·t⁻¹ carbono).

Palabras clave: Edad de corte, manejo forestal, cambio climático, valor actual neto, captura de carbono.

Introduction

Recently, several economic, ecological and environmental concerns have become a focal point of forestry research in the sustainable management of forest ecosystems (Başkent, Keleş, & Yolasiğmaz, 2008). Environmental concerns about climate change associated with increasing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere has led to addition of carbon sequestration value of forest ecosystems to the multiple-use forest planning process (Asante & Armstrong, 2012). Forest ecosystems absorb huge amounts of CO₂ from the atmosphere through photosynthesis and contribute to greenhouse gas emission reductions (Cacho, Hean, & Wise, 2003). In this context, fast growing forest plantations have had a great importance at global scale.

A series of decisions have been taken to multiple-use benefit from forest ecosystems within the principle of sustainability. Determining optimum cutting age is one of the most important decisions in forest management. This age affects the quality and quantity of all values provided by forest ecosystems such as timber products, soil conservation, water production, aesthetics, biological diversity and carbon sequestration. To this day, a few scientific studies associated with the determination of optimum cutting age in forest management planning including wood production and carbon sequestration values were performed (Asante & Armstrong, 2012; Diaz-Balterio & Rodriguez, 2006; Diaz-Balteiro, Martell, Romero, & Weintraub, 2014; Kula & Gunalay, 2012; Torres, Perez, Fernandez, & Belda, 2010). All these studies were to determine the optimum harvest time of forest stands to benefit from multiple forest ecosystem values at the same time. However, there is a need to consider new studies related to optimum cutting ages of various tree species in forest or plantation areas of different regions to contribute the literature.

More recently, a number of studies integrating carbon sequestration value to forest management problems in Turkey have been published (Başkent, Keleş, & Kadioğulları, 2014; Başkent, Keleş, Kadioğulları, & Bingöl, 2011; Keleş & Başkent, 2007; Keleş, 2010). There are also some studies to analyse the effects of land use and land cover changes on carbon sequestration amounts of forest ecosystems (Kadioğulları & Karahalil 2013; Keleş, Kadioğulları, & Başkent, 2012; Sivrikaya, Keleş, & Çakır, 2007). However, determining optimum cutting ages in forest management including multiple forest ecosystem values has not yet been sufficiently appraised in the scientific literature in Turkey.

In the present paper, we address the optimum cutting age problem by considering wood production and carbon sequestration values in a hybrid poplar

Introducción

Recientemente, varias preocupaciones económicas, ecológicas y ambientales se han convertido en un punto focal de la investigación forestal en el manejo sostenible de los ecosistemas forestales (Başkent, Keleş, & Yolasiğmaz, 2008). Las preocupaciones ambientales por el cambio climático, asociadas con el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, han llevado a la adición de valores de captura de carbono de los ecosistemas forestales para el proceso de planificación forestal de uso múltiple (Asante & Armstrong, 2012). Los ecosistemas forestales absorben enormes cantidades de CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis y contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Cacho, Hean, & Wise, 2003). En este contexto, las plantaciones forestales de rápido crecimiento han tenido gran importancia a nivel mundial.

Una serie de decisiones se han adoptado para beneficiar los usos múltiples de los ecosistemas forestales en el principio de la sostenibilidad. La determinación de la edad óptima de corte es una de las más importantes en el manejo forestal. Esta edad afecta la calidad y cantidad de los valores proporcionados por los ecosistemas forestales, como productos de madera, conservación de suelos, producción de agua, estética, diversidad biológica y captura de carbono. Hasta el día de hoy, se han realizado algunos estudios científicos asociados con la determinación de la edad óptima de corte en la planificación del manejo forestal, que incluyen producción de madera y valores de captura de carbono (Asante & Armstrong, 2012; Diaz-Balterio & Rodriguez, 2006; Diaz-Balteiro, Martell, Romero, & Weintraub, 2014; Kula & Gunalay, 2012; Torres, Perez, Fernandez, & Belda, 2010). Los estudios sirven para determinar el momento óptimo de cosecha de las masas forestales para beneficiarse, al mismo tiempo, de valores múltiples de los ecosistemas forestales; sin embargo, es necesario considerar nuevos estudios relacionados con las edades óptimas de corte de diversas especies de árboles en áreas forestales o plantaciones de diferentes regiones.

En fechas recientes se ha publicado una serie de estudios que integran el valor de captura de carbono a los problemas de manejo forestal en Turquía (Başkent, Keleş, & Kadioğulları, 2014; Başkent, Keleş, Kadioğulları, & Bingöl, 2011; Keleş & Başkent, 2007; Keleş, 2010). También existen algunos estudios que analizan los efectos del uso de suelo y los cambios en la cubierta sobre las cantidades de captura de carbono de los ecosistemas forestales (Kadioğulları & Karahalil 2013; Keleş, Kadioğulları, & Başkent, 2012; Sivrikaya, Keleş, & Çakır, 2007). Sin embargo, la determinación de las edades óptimas de corte en el manejo forestal,

plantation (*Populus x euramericana* [Dode] Guinier cv. I-214). This study also analyses the effects of different discount rates and carbon prices on optimum cutting ages using net present value approach.

Materials and Methods

Plantation data

For the case study, growth and yield curves of hybrid poplar plantations (*P. x euramericana* cv. I-214) per hectare was considered. Figure 1 shows the growth cycle of this species planted using a 4 m x 4 m planting grid in the good sites (higher productive areas where the average dominant height is above 30 m at age fifteen) and its carbon sequestration amounts (Birler, 2009). Table 1 also presents estimated costs of an afforestation project with hybrid poplar plantations in Turkey. All these values were obtained from the related units of General Directorate of Forestry in Turkey.

incluyendo valores múltiples de los ecosistemas forestales, aún no ha sido valorada suficientemente en la literatura científica en Turquía.

En el presente trabajo se aborda el problema de la edad óptima de corte al considerar la producción de madera y los valores de captura de carbono en una plantación de álamo híbrido (*Populus x euramericana* [Dode] Guinier cv. I-214). Este estudio también analiza los efectos de diferentes tipos de descuento y precios del carbono en edades óptimas de corte utilizando el método del valor actual neto (VAN).

Materiales y métodos

Datos de la plantación

Para el caso de estudio se consideró el crecimiento de *P. x euramericana* cv. I-214 y las curvas de rendimiento por hectárea. La Figura 1 muestra el ciclo de crecimiento,

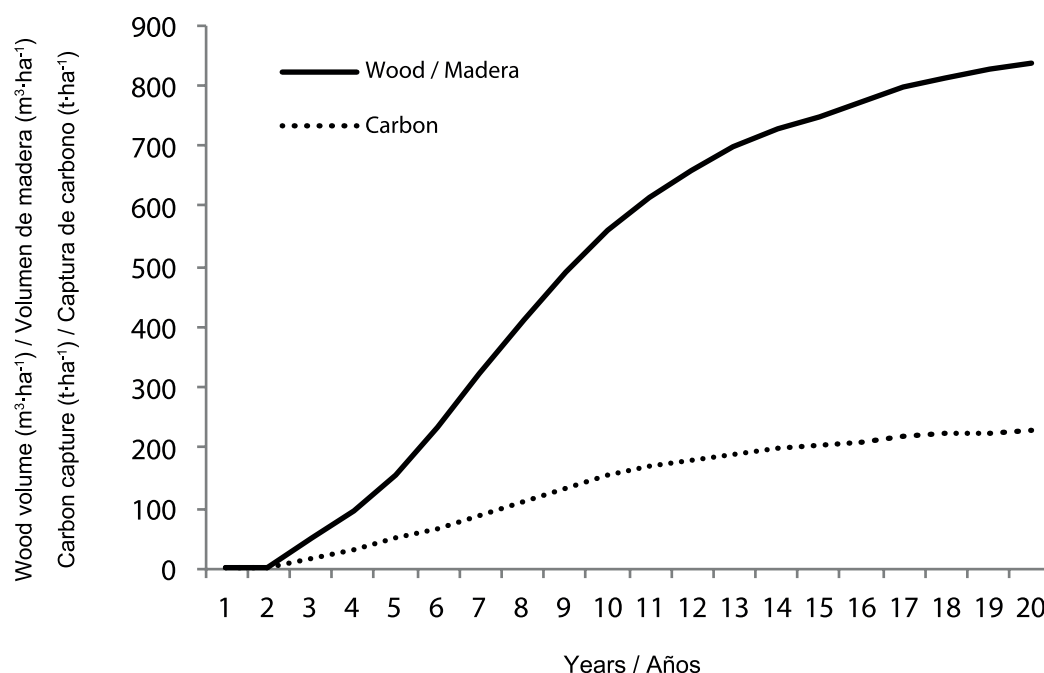


Figure 1. Wood volume and carbon sequestration of hybrid poplar plantations (*Populus x euramericana* cv. I-214) cultivated in good sites (higher productive areas where the average dominant height is above 30 m at age fifteen).

Figura 1. Volumen de madera y captura de carbono de plantaciones de bosques de álamos híbridos (*Populus x euramericana* cv. I-214) sembrados en sitios adecuados (zonas altamente productivas, donde la altura dominante promedio es superior a los 30 m a los 15 años).

Table 1. Standard operations and their costs by the years in hybrid poplar plantations (*Populus x euramericana* [Dode] Guinier cv. I-214).

Cuadro 1. Operaciones estándar y sus costos con base en los años de operación en plantaciones de álamos híbridos (*Populus x euramericana* [Dode] Guinier cv. I-214).

Operations/Operaciones	Cost details/Labores culturales	Operation years/ Años de operación	Expenditure (US\$.ha ⁻¹)/ Gasto (USD.ha ⁻¹)
Establishment/ Establecimiento	Ploughing/Arado	0	164
	Planting/Siembra	0	1,177
	Fertilization/Fertilización	0	333
Maintenance/ Mantenimiento	Beating up/Regeneración	1	333
		2	317
		3	317
		4	317
		5	214
		6	112
		7	56
		8	56
	Hoeing/Escarde	1	61
		2	61
		3	61
		4	41
		5	20
	Irrigation/Irrigación	1	85
		2	85
		3	85
		4	85
5		57	
6		57	
7		28	
8		28	
Tree-top improvement/ Mejora de árbol superior	Pruning/Poda	2	29
		4	42
		6	42
General administration/ Administración general	Management, protection and control/Manejo, protección y control	Each year/Cada año	251

Wood production data

Hybrid poplar plantations produce peeler log, sawlog, chip-wood and fire-wood in Turkey. Volumes of these wood assortments as a result of clear-cutting at any age were determined by product rates table of the relevant species (Birler, 2009). The financial data associated with wood production includes harvesting costs and wood assortments revenues. The net values of wood assortments used in this study are 20, 17, 5 and 3 US\$.m³ for peeler log, sawlog, chip-wood and fire-wood, respectively.

Carbon sequestration data

There are various approaches for estimating tree biomass. These approaches are generally based on

utilizando una rejilla para plantación 4 x 4 m en los sitios adecuados (zonas altamente productivas donde la altura dominante media es superior a 30 m a la edad de 15 años), y las cifras de captura de carbono de la especie (Birler, 2009). En el Cuadro 1 se presentan los costos estimados de un proyecto de forestación en Turquía. Los valores se obtuvieron de las unidades correspondientes de la Dirección General Forestal en Turquía.

Datos de producción de madera

De los bosques de álamo híbridos en Turquía se obtienen troncos sin corteza, madera aserrada, viruta y leña. Los volúmenes de esta clasificación de maderas, como resultado de los cortes a cualquier edad, se determinaron mediante la tabla de tarifas de productos

biomass expansion factors and tree-level allometric equations developed as a function of tree species and some stand parameters (Keleş 2015; Labrecque, Fournier, Luther, & Piercey, 2006; Sanquetta, Corte, & da Silva, 2011). To predict above-ground biomass in this study, first the standing timber volumes of hybrid poplar plantations are multiplied by species-specific biomass conversion factor. This biomass factor is set at 1.31. The average wood basic density of 0.35 is used. In order to calculate the carbon content of hybrid poplar species, a 0.48 conversion factor is used. The below-ground/root biomass is predicted as a proportion of the above-ground biomass using given root-to-shoot ratio of 0.46. All these biomass and carbon conversion factors for the relevant tree species were obtained from the literature (Tolunay, 2011).

The model

To determine the optimal cutting age for hybrid poplar plantations including carbon sequestration, the methodology (ideal carbon-accounting system) proposed by Cacho et al. (2003) was used. According to the methodology, the value of a stand of forest in the presence of carbon sequestration payments and with redemption upon harvest is as follow:

$$NPV_1(T) = v(T)xp_v[age(T)]x(1+r)^{-T} + \sum_{t=0}^T [\Delta b(t)xp_c x(1+r)^{-t}] - c_E - b(T)xp_c x(1+r)^{-T}$$

where:

$NPV_1(T)$ = Net present value of a forest harvested in year T after planting (US\$)

c_E = Forest establishment cost (US\$)

p_v = Net value of wood assortments that depend on the stand age of trees at harvest (US\$)

p_c = Price of carbon sequestration in tree biomass in tonnes per hectare

$v(T)$ = Wood volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)

$b(T)$ = Carbon stock in tree biomass ($t \cdot ha^{-1}$).

The first term on the right-hand side corresponds to the value of the wood harvest. The second term corresponds to the sum of the annual net benefits from carbon captured in the interval (0-T). The last term in the equation corresponds to the assumption that credits obtained during forest growth have to be fully redeemed upon harvest. The annual rate of carbon sequestration is estimated as $\Delta b_t = b_{(t)} - b_{(t-1)}$.

Some assumptions were also taken into consideration in this study. It is supposed that no thinning regime is employed. Clear-cutting is only one silvicultural regime. Rental value of the land is not included to estimations of net present values for timber and carbon sequestration functions. The model uses the net present value approach. A discount rate of 3 %

de las especies relevantes (Birler, 2009). Los datos financieros asociados con la producción de madera incluyen costos de cosecha e ingresos de la variedad de maderas. Los valores netos de la variedad de maderas utilizadas en este estudio son 20, 17, 5 y 3 USD·m⁻³ para troncos sin corteza, madera aserrada, viruta y leña, respectivamente.

Datos de captura de carbono

Existen varios métodos para estimar la biomasa de los árboles. Los métodos se basan generalmente en factores de expansión de biomasa y ecuaciones alométricas a nivel de árbol, desarrollados en función de las especies de árboles y algunos parámetros de la masa (Keleş 2015; Labrecque, Fournier, Luther, & Piercey, 2006; Sanquetta, Corte, & da Silva, 2011). En este estudio, la biomasa sobre el suelo se predijo, en primer lugar, multiplicando los volúmenes de madera en pie de los bosques de álamos híbridos por el factor de conversión de la biomasa de especies específicas. Este factor de biomasa se estableció en 1.31 y se utilizó la densidad básica promedio de la madera de 0.35. Con el fin de calcular el contenido de carbono de las especies de álamo híbrido, se utilizó un factor de conversión de 0.48. La biomasa de raíz subterránea se predijo como una proporción de biomasa aérea usando la proporción raíz a tallo de 0.46. Todos estos factores de conversión de biomasa y carbono para las especies arbóreas relevantes se obtuvieron de la literatura (Tolunay, 2011).

El modelo

La edad óptima de corte para los bosques de álamos híbridos, incluyendo captura de carbono, se determinó con la metodología (sistema de contabilidad de carbono ideal) propuesta por Cacho et al. (2003). De acuerdo con la metodología, el valor de la masa forestal en presencia de los pagos por captura de carbono y con la redención después de la cosecha es el siguiente:

$$NPV_1(T) = v(T)xp_v[age(T)]x(1+r)^{-T} + \sum_{t=0}^T [\Delta b(t)xp_c x(1+r)^{-t}] - c_E - b(T)xp_c x(1+r)^{-T}$$

donde:

$NPV_1(T)$ = Valor actual neto de bosque cosechado en año T después de la siembra (USD)

c_E = Costos de establecimiento agroforestal (USD)

p_v = Valor neto de la variedad de madera que depende de la edad de masa forestal de árboles en cosecha (USD)

p_c = Precio de captura de carbono en biomasa forestal ($t \cdot ha^{-1}$)

$v(T)$ = Volumen de madera ($m^3 \cdot ha^{-1}$)

$b(T)$ = Reserva de carbono en biomasa forestal ($t \cdot ha^{-1}$)

El primer término del lado derecho corresponde al valor de cosecha de la madera. El segundo término

was used, and a sensitivity analysis was also carried out. A reference price of 20 US\$.t⁻¹ for carbon sequestration was used in the analysis, and followed by a sensitivity analysis.

Results and discussion

Table 2 shows the results of optimum cutting ages of a hybrid poplar plantation for wood benefits and carbon benefits plus wood benefits depending on various discount rates and carbon prices. When carbon sequestration is not included, the optimum cutting age is 17 years based upon wood benefits at a discount rate of 3 %. When carbon sequestration was considered as a significant forest value, the optimum cutting age arises to be 19 years. Carbon sequestration benefits of 20 US\$.t⁻¹ are assumed here. For monitoring the effects of various discount rates on optimum cutting ages, a sensitivity analysis was also implemented in this study. Figures 2 and 3 show the effects of different discount rates on net present value of wood and net present values of timber plus carbon sequestration per hectare in hybrid poplar plantations, respectively. According to the figures and Table 2, the optimum cutting ages decrease for both wood benefit and wood plus carbon sequestration benefits depending on the increase in discount rates. When the discount rate decrease to 2 %, optimum cutting age for wood benefits increased to 19 years, but it was not change for wood and carbon sequestration benefits considered together. When carbon sequestration benefits are not included, net present values obtained from wood production are 7,677, 6,242, 5,221 and 4,375 US\$.ha⁻¹ for the four different discount rates considered (2, 3, 4, 5 %), respectively. The integration of carbon sequestration benefits into the model increased the net present values (NPVs) obtained from the plantation by 9, 12, 14 and 16 % for four discount rates, respectively.

corresponde a la suma de los beneficios netos anuales de carbono capturado en el intervalo (0-T). El último término de la ecuación corresponde a la suposición de que los créditos obtenidos durante el crecimiento de los bosques tienen que ser redimidos después de la cosecha. La tasa anual de captura de carbono se estima como $\Delta b_t = b_{(t)} - b_{(t-1)}$.

Algunos otros supuestos también se tomaron en cuenta en este estudio. Se supone que no se emplea algún régimen de adelgazamiento. La tala es solo un régimen silvícola. El modelo utiliza el método del VAN. El valor de renta del suelo no se incluye en las estimaciones de los VAN para las funciones de madera y captura de carbono. Se utilizó una tasa de descuento de 3 % y un precio de referencia de 20 USD.t⁻¹ para la captura de carbono, para cada caso se hizo un análisis de sensibilidad.

Resultados y discusión

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de la edad óptima de corte de una plantación de álamo híbrido y los beneficios de la madera dependiendo de varios tipos de descuento y precios del carbono. Cuando no se incluye la captura de carbono, la edad óptima de corte es de 17 años sobre la base de los beneficios de la madera a una tasa de descuento de 3 %. Cuando la captura de carbono se consideró como un valor forestal significativo, la edad óptima de fue es de 19 años. Los beneficios de captura de carbono de 20 USD.t⁻¹ se asumen aquí. Para el seguimiento de los efectos de diversos tipos de descuento en las edades óptimas de corte se llevó a cabo un análisis de sensibilidad. En las Figuras 2 y 3 se muestran los efectos de los tipos de descuento sobre los VAN de la madera, así como la captura de carbono por hectárea en bosques de álamos híbridos, respectivamente. De acuerdo con las figuras

Table 2. Optimum cutting ages of planting hybrid poplar (*Populus x euramericana* cv. I-214) for various discount rates and carbon prices.

Cuadro 2. Edades óptimas de corte de una plantación de álamo híbrido (*Populus x euramericana* cv. I-214) para para distintas tasas de descuento y precios del carbono.

Discount rate (%) / Tasa de descuento (%)	t ^W	t ^{W+C}	Definition / Definición
2	19	19	
3	17	19	Carbon price (20 US\$.t ⁻¹) / Precio del carbono (20 USD.t ⁻¹)
4	14	17	
5	13	14	
Carbon price (US\$) / Precios del carbono (USD)	t ^W	t ^{W+C}	
10	17	17	
20	17	19	Discount rate (3 %) / Tasa de descuento (3 %)
30	17	19	
40	17	20	

t^W: the optimum cutting age for only wood benefits

t^{W+C}: the optimum cutting age for wood and carbon sequestration benefits together /

t^W: edad óptima de corte únicamente para beneficios de madera,

t^{W+C}: edad óptima de corte para beneficios de madera y captura de carbono en conjunto

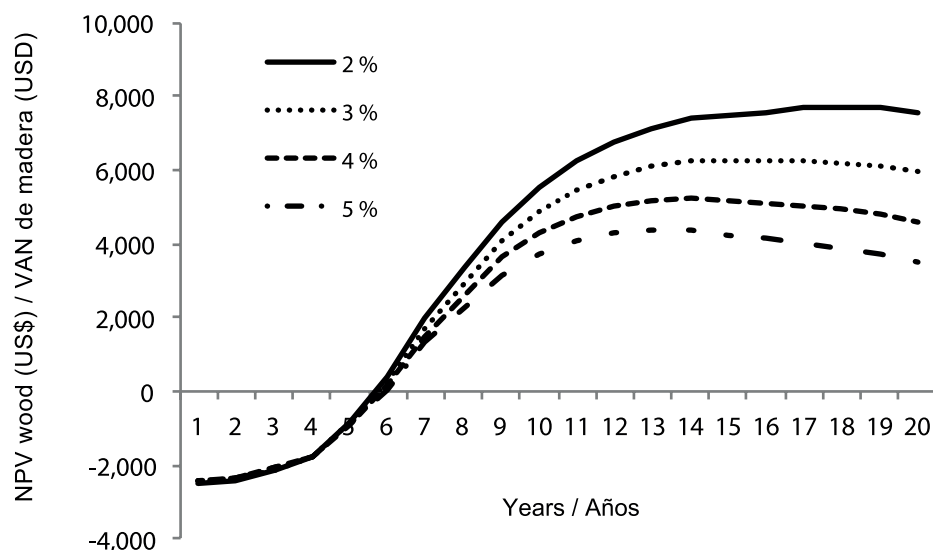


Figure 2. Net present values (NPV) of wood benefits of hybrid poplar plantations (*Populus x euramericana* cv. I-214) according to the various discount rates.

Figura 2. Valor actual neto (VAN) de los beneficios de la madera de bosques de álamo híbrido (*Populus x euramericana* cv. I-214) según diferentes tasas de descuento.

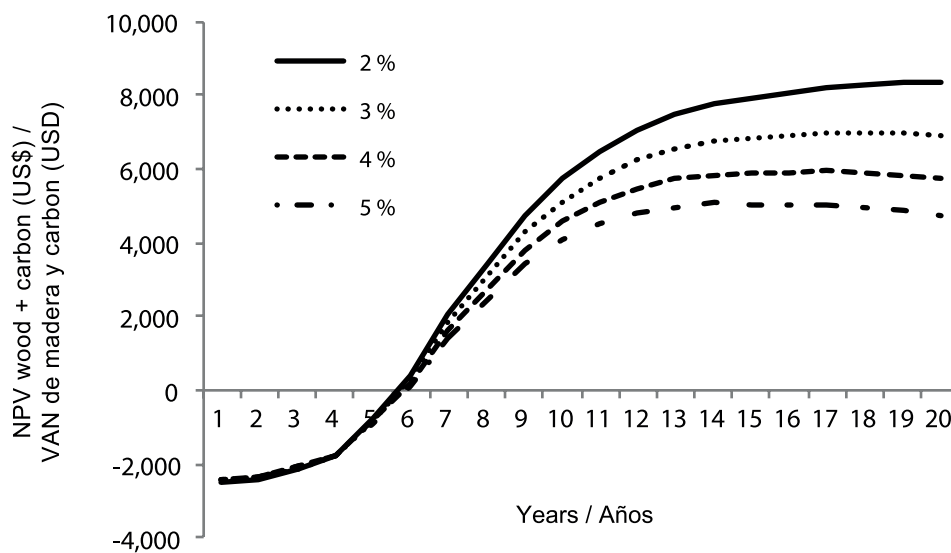


Figure 3. Net present values (NPV) of wood and carbon sequestration benefits of hybrid poplar plantations (*Populus x euramericana* cv. I-214) according to the various discount rates.

Figura 3. Valor actual neto (VAN) de los beneficios de la madera y captura de carbono de bosques de álamo híbridos (*Populus x euramericana* cv. I-214) según diferentes tasas de descuento.

With the purpose of evaluating the response to changes in carbon prices, a sensitivity analysis was also implemented in the case study. Figure 4 shows the effects of various carbon prices on total net present value per hectare of wood and carbon sequestration benefits in hybrid poplar plantations. Table 2 shows the optimum cutting ages of hybrid poplar forest stands planted with a 4 m x 4 m planting grid in the good sites depending on different carbon prices at a fixed

y el Cuadro 2, las edades óptimas de corte disminuyen tanto para beneficio de la madera como para beneficio de captura de carbono y madera en función del aumento de las tasas de descuento. Cuando la tasa de descuento disminuyó a 2 %, la edad óptima de corte para beneficio de la madera aumentó a 19 años, pero no cambió para beneficio de captura de carbono y madera considerados en conjunto. Cuando los beneficios de captura de carbono no se incluyeron, los VAN de la

discount rate of 3 %. When carbon prices increased, the optimum cutting ages of hybrid poplar plantations including wood and carbon sequestration benefits also increased from 17 years at 10 US\$ to 20 years at 40 US\$. NPVs obtained from wood production and carbon sequestration benefits per hectare also increased between 6 and 26 % (from 6,242 US\$ for 0 US\$.t⁻¹ carbon to 7,896 US\$ for 40 US\$.t⁻¹ carbon).

As expected, when the discount rate increased, optimal rotation ages were shortened. When carbon prices were introduced, results varied. The integration of carbon sequestration benefits into wood benefits increased the optimum cutting ages of hybrid poplar plantations. Further, higher carbon prices (10 and 40 US\$.t⁻¹) resulted in longer cutting ages. On the other hand, other studies have also presented the similar results for various tree species (Asante & Armstrong, 2012; Diaz-Balteiro & Rodriguez, 2006; Diaz-Balteiro et al., 2014; Kula & Gunalay, 2012; Sohngen & Brown 2008; Romero, Rios, & Diaz-Balteiro, 1998; Torres et al., 2010).

Forestry projects such as afforestation and reforestation lead to the generation of carbon credits and these credits are sold to regulated entities or to those who wish to reduce their carbon emissions (Demirci & Öztürk, 2015). Carbon projects are neglected in carbon markets now, however these markets will provide huge opportunities for the generation of forest carbon credits in the future. Turkey is one of the most active players in voluntary carbon markets in the world, and currently cannot benefit from flexible mechanisms to reduce emissions by developing forest projects because

producción de madera fueron 7,677, 6,242, 5,221 y 4,375 USD·ha⁻¹ para las tasas de descuentos de 2, 3, 4 y 5 %), respectivamente. La integración de los beneficios de captura de carbono con el modelo incrementó los VAN obtenidos a partir de la plantación, en 9, 12, 14 y 16 % para los descuentos de 2, 3, 4 y 5 %, respectivamente.

Un análisis de sensibilidad se llevó a cabo con el propósito de evaluar la respuesta a los cambios en los precios del carbono. En la Figura 4 se muestran los efectos de diversos precios de carbono sobre el VAN total por hectárea de los beneficios de madera y captura de carbono en bosques de álamos híbridos. El Cuadro 2 muestra las edades óptimas de corte de las masas forestales de álamos híbridos con respecto a los distintos precios de carbono a una tasa de descuento fijo de 3 %. Cuando los precios de carbono aumentaron de 10 a 40 USD, las edades óptimas de corte de los bosques de álamos híbridos, que incluyen beneficios de captura de carbono y madera, también aumentaron de 17 a 20 años. Los VAN obtenidos de la producción de madera y captura de carbono por hectárea también aumentaron entre 6 y 26 % (de 6.24 USD para 0 USD·t⁻¹ de carbono a 7,896 USD para 40 USD·t⁻¹ de carbono).

Como era de esperar, cuando la tasa de descuento aumentó, la edad óptima de rotación se acortó. Los resultados variaron cuando se introdujeron los precios del carbono. La integración de las prestaciones de captura de carbono con las prestaciones de madera aumentó las edades óptimas de corte de bosques de álamos híbridos. Además, los precios más elevados de carbono (30

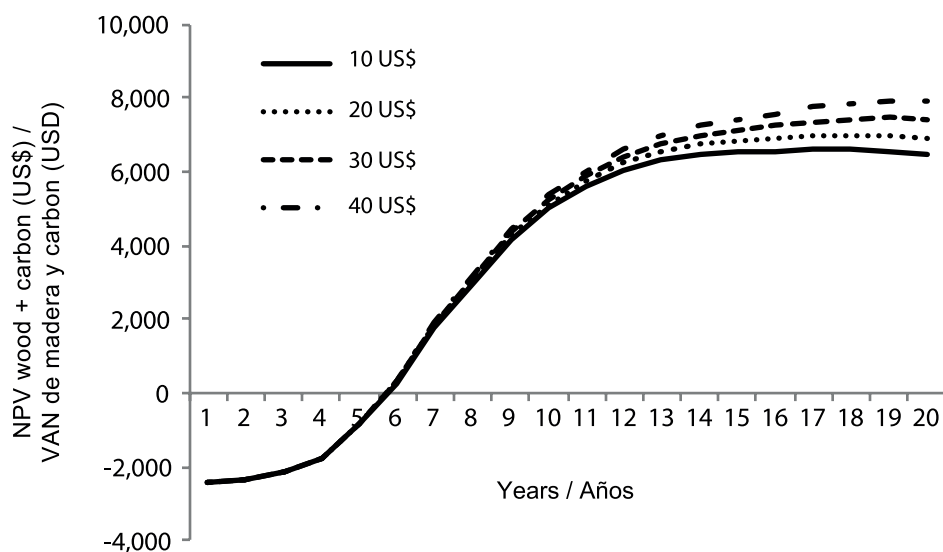


Figure 4. Net present values (NPV) of wood and carbon sequestration benefits of hybrid poplar plantations (*Populus x euramericana* cv. I-214) according to the various carbon prices.

Figura 4. Valor actual neto (VAN) de los beneficios de la madera y captura de carbono de bosques de álamo híbridos (*Populus x euramericana* cv. I-214) de acuerdo con distintos precios de carbono.

it was not a party to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) at the time the Kyoto Protocol was adopted. In this context, voluntary carbon market is extremely important for Turkey now, but Turkey will be able to benefit from the flexibility mechanisms in the future (Demirci & Öztürk, 2015). The results obtained from the current study will serve to develop reforestation or afforestation projects to reduce greenhouse gas emissions in Turkey. If sufficient monetary incentives are provided to forest landowners, plantation management in the future will encourage short rotations producing large production of wood and carbon sequestration (Nepal, Grala, & Grebner, 2012).

However, there are many ways in which the model reported in this study might be extended and improved. This study considers only clear-cutting management practice and not take into consideration the effects of different management practices on forest stand structure and values provided. Although a sensitivity analysis is carried out using different discount rates and carbon prices, there is a need to integrate some economic uncertainties such as forest product prices, market supply and demand situation, carbon prices and plantation establishment costs. It means that the model used in this study is deterministic, not stochastic. Risks caused by natural events (e. g. climate change, forest fire) and uncertainties of timber and carbon markets are not taken into consideration in this study. The high volatility in the market for carbon credits leads to significant uncertainty in future carbon revenues and it will remain an important factor to consider in economic analysis of afforestation for carbon sequestration (Nijnik, Pajot, Moffat, & Slee, 2013; Olschewski & Benitez, 2010). Although costs and prices are likely to change in future, the results derived from this study will provide valuable information on financial viability of increasing wood production and carbon sequestration benefits.

Conclusions

Fast growing tree plantations are the source of many wood products, and provide a series of environmental services like carbon sequestration by promoting climate change mitigation. It is also expected that the importance of fast growing tree plantations will increase in the future. However, they must be managed according to the sustainability principles in order to maximum benefit from forest ecosystem values such as carbon sequestration, soil protection, biodiversity conservation and water production. The determination of optimum cutting ages when considering timber production and the other forest ecosystem values together is very important for sustainable and multiple-use forest management. The results of this

y 40 USD·t⁻¹) dieron lugar a edades de corte mayores. Por otra parte, otros estudios también han presentado resultados similares para varias especies de árboles (Asante & Armstrong, 2012; Diaz-Balteiro & Rodriguez, 2006; Diaz-Balteiro et al., 2014; Kula & Gunalay, 2012; Sohngen & Brown 2008; Romero, Rios, & Diaz-Balteiro, 1998; Torres et al., 2010).

Los proyectos forestales como la forestación y reforestación dan lugar a la generación de créditos de carbono y estos créditos se venden a entidades reguladas o quienes desean reducir sus emisiones de carbono (Demirci & Öztürk, 2015). En la actualidad, los proyectos de carbono son olvidados en el mercado de carbono; sin embargo, en el futuro, estos mercados ofrecerán grandes oportunidades para generar créditos de carbono forestal. Turquía es uno de los jugadores más activos en los mercados de carbono voluntarios en el mundo y en la actualidad no puede beneficiarse de los mecanismos flexibles para reducir las emisiones mediante el desarrollo de proyectos forestales, ya que no formaba parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en el momento en que se adoptó el Protocolo de Kyoto. En este contexto, hoy en día, el mercado de carbono voluntario es extremadamente importante para Turquía, pero en el futuro será capaz de beneficiarse de los mecanismos de flexibilidad (Demirci & Öztürk, 2015). Los resultados obtenidos en este estudio servirán para desarrollar proyectos de reforestación o forestación con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en Turquía. Si se proporcionan suficientes incentivos monetarios a los propietarios de bosques, en el futuro, el manejo de plantaciones estimulará rotaciones cortas que generaran gran producción de madera y captura de carbono (Nepal, Grala, & Grebner, 2012).

No obstante, existen muchas maneras en las que el modelo presentado en este estudio podría ser ampliado y mejorado. Este estudio solo considera las prácticas de manejo de corte y no toma en consideración los efectos de otras prácticas de manejo en la estructura de masa forestal y valores proporcionados. Aunque se llevó a cabo un análisis de sensibilidad utilizando diferentes tasas de descuento y precios de carbono, es necesario integrar algunas incertidumbres económicas como precios de productos forestales, oferta y demanda, precio del carbono y costos de establecimiento de la plantación. Esto significa que el modelo utilizado en este estudio es determinístico, no estocástico. En este estudio, los riesgos causados por eventos naturales (por ejemplo, cambio climático e incendios forestales) y las incertidumbres de los mercados de madera y carbono no se toman en consideración. La alta volatilidad en el mercado de créditos de carbono conduce a una incertidumbre significativa en los ingresos futuros de carbono y seguirá siendo un factor importante a

study showed that the integration of carbon capture benefits with wood increased optimum cutting ages of hybrid poplar forests (*Populus x euramericana* cv. I-214). The optimum cutting age decreased from 19 to 14 years depending on the increase in discount rates. When carbon prices increased, optimum cutting ages also increased from 17 to 20 years. Determining optimum cutting ages including wood and carbon sequestration benefits for each fast growing tree species is extremely important for sustainable forest management in Turkey.

End of English version

References / Referencias

- Asante, P., & Armstrong, G. W. (2012). Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: A comparative statics analysis. *Journal of Forest Economics*, 18, 145-156. doi: 10.1016/j.jfe.2011.12.002
- Başkent, E. Z., Keleş, S., & Yolasiğmaz, H. A. (2008). Comparing multi-purpose forest management with timber management in incorporating timber, carbon and oxygen values: A case study. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(2), 105-120. doi: 10.1080/02827580701803536
- Başkent, E. Z., Keleş, S., & Kadioğulları, A. İ. & Bingöl, O. (2011). Quantifying the effects of forest management strategies on the production of forest values: timber, carbon, oxygen, water, and soil. *Environmental Modeling and Assessment*, 16, 145-152. doi: 10.1007/s10666-010-9238-y
- Başkent, E. Z., Keleş, S., & Kadioğulları, A. İ. (2014). Challenges in developing and implementing a decision support systems (ETÇAP) in forest management planning: A case study in Honaz and İbradı, Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(sup1), 121-131. doi: 10.1080/02827581.2013.822543
- Birler, A. S. (2009). *Industrial forest plantations*. Turkey: Düzce University, Faculty of Forestry.
- Cacho, O. J., Hean, R. L., & Wise, R. M. (2003). Carbon-accounting methods and reforestation incentives. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47(2), 153-179. doi: 10.1111/1467-8489.00208
- Demirci, U., & Öztürk, A. (2015). Carbon markets as a financial instrument in the forestry sector in Turkey. *International Forestry Review*, 17(2), 141-152. doi: 10.1505/146554815815500606
- Diaz-Balteiro, L., Martell, D. L., Romero, C., & Weintraub, A. (2014). The optimal rotation of a flammable forest stand when both carbon sequestration and timber are valued: A multi-criteria approach. *Natural Hazards*, 72(2), 375-387. doi: 10.1007/s11069-013-1013-3
- Diaz-Balteiro, L., & Rodriguez, L. C. E. (2006). Optimal rotations on *Eucalyptus* plantations including carbon sequestration- A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management*, 229, 247-258. doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.005
- Kadioğulları, A.İ., & Karahalil, U. (2013). Spatiotemporal change of carbon storage in forest biomass: A case study in Köprülü Canyon National Park. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 13(1), 1-14. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/265683339_Spatiotemporal_Change_of_Carbon_Storage_in_Forest_Biomass_A_case_Study_in_Koprulu_Canyon_National_Park
- Keleş, S. (2010). Forest optimization models including timber production and carbon sequestration values of forest

Conclusiones

Las plantaciones de árboles de rápido crecimiento son la fuente de muchos productos madereros, y proporcionan una serie de servicios ambientales como captura de carbono mediante la promoción de la mitigación del cambio climático. Por lo anterior, se espera que la importancia de las plantaciones de árboles de rápido crecimiento aumente en el futuro; sin embargo, éstas se deben manejar de acuerdo con los principios de la sostenibilidad para el máximo beneficio de los valores de los ecosistemas forestales, tales como la captura de carbono, protección del suelo, conservación de la biodiversidad y la producción de agua. La determinación de las edades óptimas de corte, al considerar la producción de madera y los demás valores de los ecosistemas forestales en conjunto, es muy importante para el manejo sostenible y de uso múltiple de los bosques. En este estudio se mostró que la integración de los beneficios de captura de carbono con los de la madera incrementó las edades óptimas de corte de los bosques de álamo híbrido (*Populus x euramericana* cv. I-214). Las edades óptimas de corte descendieron de 19 a 14 años, dependiendo del aumento en las tasas de descuento. Cuando los precios de carbono aumentaron, las edades óptimas de corte también aumentaron de 17 a 20 años. Determinar las edades óptimas de corte, incluyendo los beneficios de captura de carbono y madera para cada especie de árbol de crecimiento rápido, es extremadamente importante para el manejo sostenible de los bosques en Turquía.

Fin de la versión en español

- ecosystems: A case study. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 17(6), 468-474. doi: 10.1080/13504509.2010.519574
- Keleş, S. (2015). Comparison of alternative approaches of estimating above-ground tree biomass in a forest ecosystem of Turkey. *International Journal of Global Warming*, 9(3), 397-406. doi: 10.1504/IJGW.2016.075449
- Keleş, S., & Başkent, E. Z. (2007). Modeling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: A case study. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(3), 473-479. Retrieved from <http://www.pjoes.com/pdf/16.3/473-479.pdf>
- Keleş, S., Kadioğulları, A. İ., & Başkent, E. Z. (2012). The effects of land-use and land-cover changes on carbon storage in forest timber biomass: A case study in Torul, Turkey. *Journal of Land Use Science*, 7(3), 125-133. doi: 10.1080/1747423X.2010.537789
- Kula, E., & Gunalay, Y. (2012). Carbon sequestration, optimum forest rotation and their environmental impact. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 18-22. doi: 10.1016/j.eiar.2011.08.007
- Labrecque, S., Fournier, R. A., Luther, J. E., & Piercey, D. (2006). A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management*, 226(1-3), 129-144. doi:10.1016/j.foreco.2006.01.030
- Olschewski, R., & Benitez, P. C. (2010). Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics*, 16(1), 1-10. doi: 10.1016/j.jfe.2009.03.002
- Nepal, P., Grala, R. K., & Grebner, D. L. (2012). Financial feasibility of increasing carbon sequestration in harvested wood products in Mississippi. *Forest Policy and Economics*, 14(1), 99-106. doi: 10.1016/j.forpol.2011.08.005
- Nijnik, M., Pajot, G., Moffat, A. J., & Slee, B. (2013). An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change. *Forest Policy and Economics*, 26, 34-42. doi: 10.1016/j.forpol.2012.10.002
- Romero, C., Rios, V., & Diaz-Balteiro, L. (1998). Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: theory and applications. *The Journal of the Operational Research Society*, 49(2), 121-131. doi: 10.2307/3009978
- Sanquetta, C. R., Corte, A., & da Silva, F. (2011). Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*, 6(6), 1-8. doi:10.1186/1750-0680-6-6
- Sivrikaya, F., Keleş, S., & Çakır, G. (2007). Spatial distribution and temporal change of carbon storage in timber biomass of two different forest management units. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132(1-3), 429-438. doi: 10.1007/s10661-006-9545-6
- Sohngen, B., & Brown, S. (2008). Extending timber rotations: Carbon and cost implications. *Climate Policy*, 8(5), 435-451. doi: 10.3763/cpol.2007.0396
- Tolunay, D. (2011). Total carbon stock and carbon accumulation in living tree biomass in forest ecosystems of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 35(3), 265-279. doi:10.3906/tar-0909-369
- Torres, I. L., Perez, S. O., Fernandez, A. M., & Belda, C. F. (2010). Estimating the optimal rotation age of *Pinus nigra* in the Spanish Iberian System applying discrete optimal control. *Forest Systems*, 19(3), 306-314. doi: 10.5424/fs/2010193-8560