



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

Escuela Técnica Superior de
Ingenierías Agrarias

**Máster en Investigación en Ingeniería para la
Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales**

**EVALUACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO
CON DIFERENTES ALTERNATIVAS DE GESTIÓN
SELVÍCOLA EN MONTE BAJO DE CASTAÑO EN
EL NORTE DE ESPAÑA**

Autora: Marta Prada Monteagudo

Directores: Celia Martínez Alonso y Felipe Bravo Oviedo

Junio, 2014

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Felipe Bravo y Celia Martínez por haber sido los tutores de este trabajo y por todas las enseñanzas, correcciones, sugerencias, ideas y ayuda recibida.

Gracias a Juan Majada por haberme permitido realizar el trabajo fin de máster en el CETEMAS.

Gracias a La Caixa por haberme concedido la beca para realizar el Máster en el que se enmarca el presente Trabajo.

Gracias a Elena Canga por todas las dudas, preguntas, indecisiones, etc.

Gracias a María por proporcionarme la información y los datos con los que se pudo desarrollar este trabajo.

Gracias a todo el personal del Cetemas que colaboró directa e indirectamente en este trabajo.

Gracias a mis padres, a mi familia y a Toni por haberme apoyado y haber confiado en mí.

Por último decir que todas las personas son igual de importantes, puesto que cada una aportó un granito de arena en la realización de este trabajo, por eso os quiero decir **¡GRACIAS A TODOS!**

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
MATERIAL Y MÉTODOS	5
Área de estudio	5
Modelo CO2FIX v 3.1.....	7
Módulo de biomasa	7
Módulo suelo	8
Módulo de productos	9
Simulación de las alternativas de manejo selvícolas	12
RESULTADOS	13
Evaluación y validación del modelo.....	13
Efecto de la simulación en las alternativas de manejo selvícolas	14
Carbono almacenado en la biomasa, suelo y productos.....	14
Carbono total	19
DISCUSIÓN.....	21
BIBLIOGRAFÍA.....	25

RESUMEN

Las masas forestales y las actividades de manejo forestal juegan un papel importante en la fijación del carbono, por lo que el desarrollo de modelos predictivos que permitan conocer la evolución de su almacenamiento bajo diferentes escenarios de manejo, supone una herramienta esencial para evaluar sus efectos de mitigación frente al cambio climático. Los objetivos del presente estudio fueron determinar la línea base de almacenamiento de carbono en monte bajo de castaño (*Castanea sativa* Mill.), evaluar el efecto de la gestión forestal (claras) en el almacenamiento de carbono mediante el uso del modelo CO2FIX y, validar los resultados del modelo con una red de parcelas permanentes. El área de estudio se localiza en Asturias (norte de España). El modelo CO2FIX se utilizó para estimar el contenido de carbono en varios componentes del bosque: biomasa aérea y radicular, suelo y productos. El modelo se parametrizó en función de la edad del rodal, a través de datos de crecimiento de fuste, hojas, ramas y raíces, datos climáticos, período de retorno (“*turnover*”), eficiencia del aserradero, tipología de productos (larga, media y corta duración) y su destino final. La eficiencia del aserradero fue medida *in situ* a través del Factor de Recuperación Lineal de cada producto. Se evaluaron 5 alternativas selvícolas: (1) línea base con edad de corta a los 40 años; (2a) selección de brotes a los 10 años, clara a los 15 años, y corta final a los 40, y (2b) corta final a los 60 años; (3a) selección de brotes a los 10 años, clara a los 15 años, clara a los 26 años y corta final a los 40, y (3b) corta final a los 60 años. En todos los escenarios la cantidad de carbono en la biomasa y en el suelo disminuyó respecto a la línea base, menos en el escenario 2b, donde se realizó una clara con elongación del turno. Los escenarios en los que sólo se realizó una clara permitieron acumular más carbono total que la línea base, sobretodo en el que se aumentó el turno en 20 años (2b). Sin embargo, los escenarios con dos claras no llegaron a alcanzar el valor de carbono total de la línea base. La cantidad de carbono acumulado en los productos fue mayor en todos los escenarios propuestos menos en el escenario 3a respecto a la línea base. Los productos que más carbono acumularon fueron los de vida larga, existiendo este tipo de productos en una mayor proporción en los escenarios con claras. La comprobación del ajuste del modelo mostró una relación significativa entre los datos predichos y observados para el caso de la biomasa aérea ($R^2=0,37$), biomasa radicular ($R^2=0,57$) y biomasa total ($R^2=0,50$), pero no para el suelo ($R^2=0,003$). El modelo CO2FIX permitió la observación de la dinámica de almacenamiento y de captura de carbono en función del tratamiento selvícola aplicado.

ABSTRACT

Forests and forest management activities play an important role in carbon sequestration. The development of predictive models that enable to know how carbon storage progresses under different silvicultural management scenarios is an essential tool for evaluating the effects of mitigating climate change. The goals of this study were to evaluate the baseline carbon capture of sweet chestnut coppice (*Castanea sativa* Mill.) in the north of Spain, to assess the effect of forest management (thinning) on carbon storage by using the CO2FIX model and to validate results with a network of permanent plots. The study area is located in Asturias (Northern Spain). The CO2FIX model was used to estimate carbon content in different forest components: aboveground and belowground biomass, soil and wood products. Model parameterization was made as a function of stand age, through growth data of stems, foliage, branches and roots, climate data, litterfall rates, sawmill wood processing data, life span of products (long-, medium- and short-term) and their final end. Sawmill efficiency was measured in situ by the Lumber Recovery Factor. Five different management scenarios were simulated: (1) harvest set at 40 years (cutting age); (2a) selection of sprouts at 10 years, one thinning at 15 years and harvest at 40 years, and (2b) harvest at 60 years; (3a) selection of sprouts at 10 years, thinning at 15 years, thinning at 26 years and final cutting at 40 years, and (3b) harvest at 60 years. In all scenarios the amount of carbon in biomass and soil decreased compared to baseline, except in the scenario where a thinning with elongation of the cutting age was performed (2b). The scenarios in which only one thinning was made, allowed accumulating more total carbon than the baseline, especially when the cutting age was increased in 20 years (2b). However, the scenarios with two thinning did not reach the baseline value of total carbon. The amount of carbon stored in products was higher in all scenarios proposed compared to baseline, except for scenario 3a. Wood products that accumulated more carbon were long-life products. These products existed in a higher proportion in the thinning scenarios. Model validation showed a significant relation between observed/predicted carbon values for aboveground ($R^2=0.37$), belowground ($R^2=0.57$) and total biomass ($R^2=0.50$), but not for soil ($R^2=0.003$). The CO2FIX model enabled observation of storage and capture dynamics depending on the silvicultural treatment applied.

INTRODUCCIÓN

La gestión forestal se ha convertido en una prioridad política a nivel internacional, no sólo por su influencia en el desarrollo de estrategias de mitigación de cambio climático, sino también por el reciente interés que suscita el uso de las energías renovables, como la biomasa leñosa, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Lippke *et al.*, 2011). En la actualidad, alrededor del 90 % de los bosques en los países industrializados se encuentran gestionados (FAO, 2001). En Europa más del 80% de los bosques se encuentra bajo gestión forestal sostenible (FAO, 2010), generando que la gestión forestal contribuya a una reducción significativa en las emisiones de carbono (Groen *et al.*, 2006). Además, aproximadamente el 40% del incremento anual de madera es utilizado, obteniéndose en 2010 más de 578 millones de m³ de madera en rollo. A su vez los bosques europeos absorbieron 870 millones de t de CO₂ entre 2005 y 2010, lo que corresponde con el 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas (UNECE & FAO, 2011).

El conocimiento del ciclo de carbono en la dinámica forestal, permite conocer las cantidades de carbono acumuladas, así como los lugares de almacenamiento y los flujos entre los distintos compartimentos (biomasa, madera muerta, suelo y productos) de una masa forestal (Pérez-Cruzado *et al.*, 2012; Ruiz-Peinado *et al.*, 2013) y a su vez observar como las actividades de gestión forestal influyen en el mantenimiento, incremento o decrecimiento de carbono.

El almacenamiento de carbono en los bosques y en los productos forestales ha sido propuesto como una estrategia apropiada en la mitigación del cambio climático (Bravo *et al.*, 2008a), considerando no sólo los sistemas forestales sino toda la cadena monte-industria. El carbono almacenado en los productos maderables permanece retenido hasta el final de su vida útil, mientras que al mismo tiempo el bosque se va regenerando, volviendo a crecer y a acumular carbono (Karjalainen *et al.*, 1994). Su tiempo de residencia dependerá del tipo de productos a los que se destine la madera, ya sean de corta, media o larga duración, su destino final (vertedero, reciclaje o producción de energía) y de la eficiencia del proceso de transformación en la conversión de los productos. La producción de una mayor cantidad de productos de larga duración contribuye a aumentar el almacenamiento de carbono (Por ese motivo, en los últimos años, algunos investigadores han centrado sus esfuerzos en evaluar el carbono almacenado en los productos maderables (Profft *et al.*, 2009; Martel, 2010), a pesar de no estar incluido en los acuerdos de Kyoto (1998). Sin embargo, de acuerdo con el informe de la FAO sobre la evaluación de los recursos forestales mundiales

(2010) casi el 80% de las extracciones corresponden a madera en rollo, lo que indica la importancia de considerar los productos forestales de larga y media duración en el almacenamiento de carbono. Además, si se considera el efecto de sustitución de materiales usados en construcción por madera se podría también contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera (Gustavsson & Sathre, 2011).

La posibilidad de múltiples alternativas de gestión selvícola hace, que el desarrollo de modelos predictivos que permitan conocer la evolución del almacenamiento de carbono bajo diferentes escenarios de manejo, suponga una herramienta esencial para evaluar sus efectos de mitigación frente al cambio climático. En Europa, existen estudios que cuantifican la cantidad de carbono a través de modelos predictivos en la cadena biomasa-suelo-producto en bosques manejados y para distintas especies de coníferas y frondosas (Nabuurs y Schelhaas, 2002; Maser *et al.*, 2003). Sin embargo, en España, aunque los efectos en el almacenamiento de carbono en sistemas forestales han sido ampliamente estudiados (Montero *et al.*, 2005), son todavía pocos los estudios que evalúan y modelizan la influencia del manejo forestal en la acumulación de carbono (ej, Bravo *et al.*, 2008b; Pérez-Cruzado *et al.*, 2012), centrándose principalmente en coníferas (ej, Ruiz-Peinado *et al.*, 2013). Más escasos son los trabajos enfocados en evaluar el almacenamiento de carbono en los productos (ej, Lizarralde *et al.*, 2008). Sin embargo, para demostrar el impacto de las posibles medidas de gestión forestal, es necesario el desarrollo de modelos que simulen varias alternativas selvícolas a lo largo del tiempo, que permitan observar los cambios en el almacenamiento de carbono, y proporcionen una herramienta de gestión para ayudar en la toma de decisiones y elaboración de políticas.

En este estudio se evalúa el efecto de diferentes alternativas de gestión selvícola para masas de castaño (*Castanea sativa* Mill.) en monte bajo en Asturias (norte de España). En Asturias, esta especie ocupa una superficie de 123.549 ha, principalmente como monte bajo (DGCONA, 2003), con un volumen total de corta de 24.664 m³ (SADEI, 2011). La industria de la madera en esta región se caracteriza por la existencia de pequeños aserraderos que procesan en torno al 26 % del volumen de madera cortada, mientras que el resto es aprovechado para su transformación en productos por una única empresa de mayores dimensiones. Los destinos y usos de la madera de castaño dependen de las dimensiones alcanzadas por el árbol. Las actuales masas de monte bajo de castaño en Asturias son el resultado de cambios culturales y económicos ocurridos a finales del siglo XVIII. Tradicionalmente, el castaño ha sido muy utilizado en la construcción de viviendas, hórreos, paneras,

cuadras y muebles, así como para su aprovechamiento de fruto y leña. Sin embargo, el abandono que han sufrido estas masas en las últimas décadas, junto con la ausencia de selección de brotes, ha hecho que muchas masas estén degradadas, excesivamente densas y pasadas de turno, obteniendo en la actualidad masas extra maduras e inestables. Para solventar esta situación el gobierno del Principado de Asturias ha puesto en marcha iniciativas de manejo y explotación de la especie para evitar así la degradación de la misma (Álvarez-Vergel *et al.*, 2011). En este marco las acciones propuestas se basan principalmente en la realización de claras a diferentes edades de la masa. Como parte de la gestión forestal, la evaluación del efecto de las claras es importante puesto que incrementan el crecimiento en diámetro y el valor económico de los árboles que quedan en pie, por lo que resulta muy interesante conocer cómo afectan los distintos regímenes y rotaciones tanto al crecimiento y producción maderable como a la fijación de carbono.

OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es parametrizar el modelo CO2FIX (v 3.1) (Maser *et al.*, 2003; Schelhaas *et al.*, 2004) para monte bajo de castaño en Asturias. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos: (1) determinar la línea base de captura de carbono en monte bajo de castaño, (2) validar el modelo CO2FIX para las masas objeto de estudio mediante una red de parcelas permanentes y (3) evaluar la variación del almacenamiento de carbono debido a diferentes alternativas de manejo selvícolas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio se localiza en masas de monte bajo de castaño (*Castanea sativa* Mill.) en la provincia de Asturias (norte de España) (Figura 1). Estas masas se distribuyen entre los 176 y los 880 metros, sobre terrenos montañosos con exposición y pendiente variable (19-75%). La temperatura media anual es de 10-11°C, y la precipitación media anual varía entre 818 y 1380 mm, con un régimen de precipitaciones de 525-821 mm distribuidos a lo largo de la estación de crecimiento (de marzo a octubre). El régimen de humedad del suelo es Údico, con humedad en el suelo suficiente en la estación de crecimiento, a excepción de un mes de sequía en

verano (IGME, 2001). El suelo posee una textura franco arenosa y/o franco arcillo arenosa. En la actualidad la mayoría de estas masas de castaño se encuentran abandonadas y/o pasadas de turno (T=40 años) debido a una ausencia de manejo por parte de los propietarios, siendo muy pocas las que han sido sometidas a un manejo escaso o de baja intensidad, mediante una corta a hecho a la edad de turno.

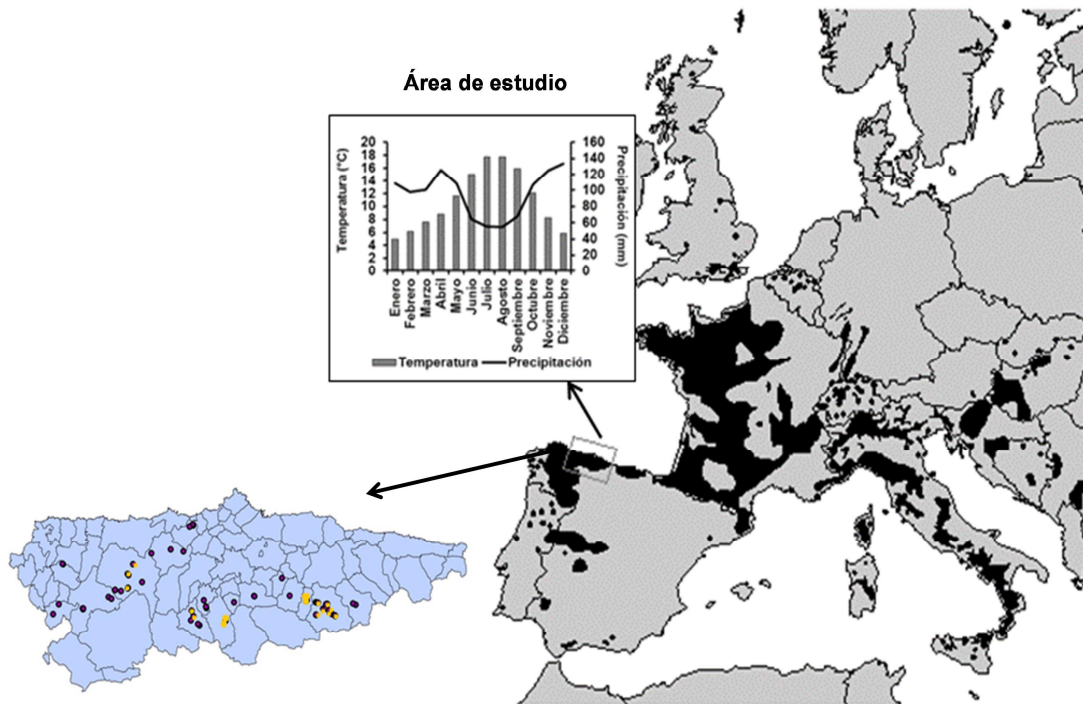


Figura 1. Distribución del castaño en Europa, localización del área de estudio y localización de las parcelas de estudio (marcadas con color amarillo en el mapa).

Para llevar a cabo este estudio se utilizaron 15 parcelas permanentes de 15 m de radio, pertenecientes a una red de 70 parcelas permanentes establecidas por el CETEMAS (Menéndez-Miguélez *et al.*, 2013) en toda el área de distribución del castaño en Asturias (Tabla 1). Las parcelas elegidas se corresponden con un índice de sitio de 19 metros a la edad de referencia de 30 años (Cabrera, 1997), por ser la calidad mejor representada en rango de edades en las parcelas permanentes, y por representar las características medias de las masas de castaño de la región.

Tabla 1. Características de la masa en las parcelas (15) estudiadas de *Castanea sativa* Mill.

	Calidad media (IS=19 m) ¹			
	Med.	Max.	Min.	D.E.
Edad (años)	35	55	14	12,4
N (pies/ha)	1903	4315	608	1193
G (m²/ha)	38,9	52,7	16,3	11,2
dg (cm)	18,5	30,9	8,4	6,6
W total (Mg/ha)	168,2	279,0	58,3	65,8

¹edad de referencia=30 años. N= densidad; G=Área basimétrica; dg=diámetro medio cuadrático; w total=biomasa total; Med=media; Max=máximo; Min=mínimo; D.E.=desviación estándar.

Modelo CO2FIX v 3.1.

El modelo CO2FIX v 3.1. (Maser *et al.*, 2003; Schelhaas *et al.*, 2004) cuantifica de forma simplificada el almacenamiento de carbono de una masa forestal proporcionando información sobre el flujo y balance de carbono en el tiempo, permitiendo realizar simulaciones para múltiples rotaciones. Su aplicabilidad se ha demostrado con anterioridad para una amplia tipología de bosques europeos (ej, Nabuurs y Schelhaas, 2002;), bosques tropicales (ej, Groen *et al.*, 2006), plantaciones y/o monocultivos (ej, Pérez-Cruzado *et al.*, 2012) y monte bajo (ej, Schelhaas *et al.*, 2004). CO2FIX v 3.1. (<http://www.efi.fi/projects/casfor/>), se compone de seis módulos: biomasa, suelo, productos, bioenergía, financiero y contabilidad de carbono. En este trabajo se consideraron los tres primeros módulos, puesto que se evaluó toda la cadena monte-industria.

Módulo de biomasa

El módulo de biomasa estima el carbono fijado en la biomasa a partir del incremento volumétrico anual del tronco, ramas, hojas y raíces, mortalidad natural, competencia, mortalidad por gestión forestal y características de los tratamientos selvícolas a simular.

El módulo de biomasa se parametrizó en función de la edad. La información relativa a la producción de madera (crecimiento corriente anual, CAI, m³/ha*año) se obtuvo a partir de las tablas de producción de Cabrera (1997) desarrolladas para monte bajo de castaño en Asturias. El cálculo del carbono almacenado en el fuste se realizó considerando la densidad de la madera y su contenido en carbono. El porcentaje en peso de carbono de materia seca utilizado para la especie fue 48,4% (Montero *et al.*,

2005). Este valor se utilizó para todas las fracciones de biomasa (fuste, ramas, hojas y raíces) al no encontrarse datos específicos de la especie por fracciones. El valor usado para la densidad de la madera de castaño fue de 0,584 Mg /m³ a una humedad del 12% (Vega, 2013). El cálculo del almacenamiento de carbono en el resto de los compartimentos de biomasa (hojas, ramas y raíces) se calculó como fracciones relativas al ratio de crecimiento de la biomasa del fuste y sus respectivos contenidos de carbono (Schelhaas *et al.*, 2004).

La estimación de la biomasa de hojas y ramas se efectuó con las ecuaciones de biomasa aérea desarrolladas por Menéndez-Miguélez *et al.* (2013) para esta especie en monte bajo en el norte de España, que emplean el diámetro normal (dn) y la altura total (h) del árbol como variables independientes. Mientras que en el caso de las raíces, en ausencia de ecuaciones de biomasa radicular de monte bajo de castaño, se empleó el modelo de biomasa de raíz desarrollado por Ruiz-Peinado *et al.*, (2012) para esta especie en monte alto para España, y que usa como variable independiente el dn del árbol.

La mortalidad natural se evaluó en todas las parcelas a los dos años de realizar los inventarios, contabilizando el número de pies muertos desde que se realizó el inventario, obteniendo una tasa de mortalidad del 0,03%. Este valor fue utilizado para la simulación considerándolo constante durante todo el turno. La mortalidad en función del manejo y la competencia no se consideraron en este estudio por ausencia de datos.

Módulo suelo

Este módulo describe la descomposición y dinámica de carbono en suelos bien drenados según el modelo Yasso (Liski *et al.*, 2005), en función de los datos climáticos de las parcelas (suma de temperaturas de todos los días del año que superen los 0°C, precipitación y evapotranspiración potencial durante el periodo de crecimiento de la masa) y el aporte de materia orgánica anual de las fracciones de biomasa (fuste, ramas, hojas y raíces) que es incorporada al suelo (“*turnover*”).

Los datos climáticos medios utilizados se obtuvieron a partir del Atlas climático digital de la Península Ibérica (Ninyerola *et al.*, 2005) en función de la localización de las parcelas estudiadas.

El aporte de las distintas fracciones al suelo no fue evaluado en campo de forma directa, excepto en el caso del fuste que se contabilizaron los fustes caídos durante el tiempo transcurrido entre el inventario y el conteo de pies muertos. El aporte de las

otras fracciones se estimó, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: para el caso de las hojas se consideró un valor para el periodo de retorno (“turnover”) de 1 puesto que el castaño es una especie caducifolia que pierde sus hojas todos los años, aportando anualmente toda la fracción de hojas. El aporte de ramas al suelo considerado fue de 0,40 Mg/C (Patricio *et al.*, 2012) para monte alto de castaño. El aporte de raíces al suelo se calculó con la ecuación propuesta por Dahlman & Kucera (1965) y testada por Gill & Jackson (2000) para distintos gradientes climáticos y distintos grupos de plantas usando una base de datos compuesta por 190 artículos publicados con anterioridad. Se utilizó dicha ecuación debido a ausencia de datos específicos para la especie en la bibliografía (ecuación 1).

$$\text{Aporte de raíz} = \frac{\text{Producción anual de biomasa radicular (kg /ha y año)}}{\text{Máximo de biomasa radicular (kg/ha)}} \quad (1)$$

La producción anual de biomasa radicular se estimó por diferencia de la producción de raíces para distintas edades consecutivas desde 0 a 40 años (edad de turno). Para ello se ajustó un modelo que relaciona la edad con la biomasa de raíz, obteniendo así para cada edad un valor de biomasa. Este último parámetro se estimó a partir de las ecuaciones de Ruiz-Peinado *et al.* (2012) utilizando los datos de las parcelas permanentes estudiadas. Para ello se ajustó un modelo (ecuación 2), donde $W_{raíz}$ es biomasa de raíz (kg/ha) y t es la edad, mediante análisis de regresión no lineal con el procedimiento NLIN del programa estadístico SAS/STAT® (v.9.1. SAS Institute Inc. 2004). Previamente al ajuste no lineal, se linealizó la ecuación para el cálculo de los valores de los parámetros, utilizando estos como valores inicializadores en la regresión no lineal. Además se calculó el coeficiente de determinación (R^2).

$$W_{raíz} = b_0 * \exp^{(t*b_1)} \quad (2)$$

Módulo de productos

Este módulo sigue el rastro del carbono en la madera desde su aprovechamiento hasta su transformación en diversos productos y su destino final (Masera *et al.*, 2003). Está basado en un modelo desarrollado por Karjalainen *et al.* (1994) para desarrollar un modelo de la dinámica del carbono del sector forestal en Finlandia, aunque una versión más actualizada ha sido usada por el sector forestal europeo (Eggers, 2002, Karjalainen *et al.*, 2002). Para ello clasifica el material recién extraído del monte en diferentes subproductos (madera aserrada, madera para desintegración, papel o leña) en función del tamaño de las trozas. La distribución de la materia prima para la

elaboración de los distintos productos se llevó a cabo de acuerdo con el aprovechamiento de madera de castaño que se realiza en Asturias. Los datos se obtuvieron de la empresa (MADERAS SIERO, S.A <http://www.sierolam.com/MSIndex.asp>) que es la empresa que mayor volumen de madera de castaño procesa en esta región (74 % respecto al total) (SADEI, 2011). El tipo de producto que se obtiene de cada intervención selvícola fue medido directamente en aserradero.

Los productos estudiados que se fabrican en el aserradero y se obtienen de las trozas de castaño fueron: vigas, pontones, tablas, tablones, postes y leña. Para conocer el porcentaje destinado a cada producto y/o subproducto se realizó un seguimiento de las trozas de castaño, consideradas según la descripción de CO2FIX como madera aserrada, que llegan directamente al aserradero desde el monte, siguiendo la metodología propuesta por Martínez-Alonso *et al.* (2012). Las trozas se dimensionaron, etiquetaron y pintaron sus testas siguiendo un código de colores para poder tener una trazabilidad de las mismas en función de las etapas de aprovechamiento dentro del aserradero (aserrado, secado, canteado, cepillado y optimizado). Los productos obtenidos en cada uno de los procesos se dimensionaron para poder determinar la pérdida de volumen y se pesó la madera (subproducto) eliminada en cada proceso. En el proceso de secado se consideró la contracción que sufrió la madera tras ser secada (4% en espesor y 7% en ancho) (Wade *et al.*, 1992; Fernández-Golfín & Álvarez, 1998).

Mediante el Factor de Recuperación lineal (FRL) en función del volumen de las trozas y del volumen del producto estudiado se obtuvo el porcentaje de madera destinada a cada producto (ecuaciones 3 y 4).

$$V_{troza} = \pi \frac{\left(\frac{\phi_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\phi_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\phi_1 \phi_2}{2}\right)}{3} \quad (3)$$

$$FRL = \frac{V_{troza}}{V_{producto}} 100 \quad (4)$$

Donde V_{troza} es el volumen de la troza (m^3), ϕ_1, ϕ_2 son los diámetros de cada extremo de la troza (m), l el largo de la troza (m) y $V_{producto}$ es el volumen del producto final (m^3).

Para el caso de la viga y el tablón el FRL se calculó mediante la herramienta informática SimSaw 6.0.7 (CSIR, 2000). Esta herramienta, simula el aserrado de una troza, proporcionando información sobre el número y volumen del producto de madera

obtenido en función del diámetro de la troza procesada, y la cantidad de subproductos y material de desecho que se produce durante el proceso (ej. astillas o serrín).

El módulo de productos distingue tres categorías de productos finales en función de su vida útil: largo, medio y corto plazo. Las vigas y pontones al ser material destinado para construcción se clasificó como producto de larga duración (Eggers, 2002), con una vida útil de 40 años (Mathiue *et al.*, 2012). Los postes, al ser reemplazados cada cierto tiempo puesto que están a la intemperie, junto con las tablas y tablones, por su posibilidad de ser utilizadas en la fabricación de muebles, se consideraron de vida media. Y la leña al ser utilizada para bioenergía se consideró producto de corta duración. La vida media de los productos de duración media (15 años) y corta (1 año) se consideró a partir de los parámetros por defecto del CO2FIX, por falta de datos primarios (Schelhaas *et al.*, 2004). En el caso de los productos de larga y media duración se consideró el final de su vida útil en vertedero, y para el caso de los productos de corta duración se consideró su destino final como bioenergía. *Evaluación y validación del modelo*

La comprobación de la capacidad de ajuste del modelo desarrollado con CO2FIX se realizó comparando los resultados de almacenamiento de carbono simulados por el modelo (valores predichos), frente a los valores derivados de la medición directa en campo (valores observados). Esta comparación se realizó mediante un análisis de regresión lineal usando el procedimiento REG del programa estadístico SAS/STAT® (v.9.1. SAS Institute Inc. 2004). Para evaluar la bondad del ajuste se utilizó el coeficiente de determinación (R^2). Asimismo, se realizó un análisis gráfico comparando los valores predichos por el CO2FIX frente a los observados. Todo ello se comprobó para la biomasa y el suelo, utilizando las 15 parcelas usadas en la simulación del modelo.

La biomasa aérea se estimó directamente a partir de los datos de dn y h , en función de las ecuaciones de Menéndez-Miguélez *et al.* (2013) y la biomasa radicular a partir de las ecuaciones de Ruiz-Peinado *et al.* (2012). La elección de las ecuaciones se explicó en el módulo de biomasa.

La densidad de carbono del suelo se estimó para la capa mineral. Para ello se tomó una muestra representativa de suelo por parcela, formada por 5 submuestras que se tomaron en forma de Z, localizadas en diversos puntos de la parcela, para obtener una representación en la distribución espacial de las submuestras. Las submuestras de suelo se adquirieron una vez retirada la cubierta vegetal de la superficie del suelo y la

primera capa de materia orgánica (20 cm). También se tomaron datos de profundidad y volumen de piedras. La densidad de carbono en el suelo se estimó con la ecuación utilizada por Pérez-Cruzado *et al.* (2012) y Ruiz-Peinado *et al.*, (2013), donde CD es la densidad de carbono en el suelo (MgC/ha), CC es la concentración de carbono (en tanto por uno), D_b es la densidad aparente (g/cm^3), T es la profundidad (cm) y S es la pedregosidad (en tanto por uno) (ecuación 5).

$$CD = CC * D_b * T * (1 - S) * 100 \quad (5)$$

D_b no pudo ser medido directamente en campo, y se estimó usando la calculadora de propiedades hidráulicas en función de la textura del suelo (“*Soil Texture Triangle Hydraulic Properties Calculator*”) desarrollada por Pedosphere.Ca y basada en las ecuaciones de Saxton *et al.*, (1986).

Simulación de las alternativas de manejo selvícolas

Una vez realizada la validación del modelo se plantearon **cinco alternativas selvícolas** para monte bajo de castaño en Asturias (Tabla 2). Para ello se estableció como línea base (escenario 1) el sistema actual de aprovechamiento que se realiza en la zona para la especie: corta final a la edad de turno (40 años) sin intervenciones selvícolas previas. En el escenario 2 se planteó una selección de brotes a los 10 años, una clara a los 15 años, y corta final a dos edades diferentes, a los 40 años (2a) y a los 60 años (2b). En el escenario 3 se plantearon las mismas intervenciones selvícolas que en el escenario 2 pero añadiendo una clara a la edad de 26 años, siguiendo la propuesta realizada por Smartel (2010) para monte bajo de castaño en Francia y también a dos edades de corta final, 40 años (escenario 3a) y 60 años (escenario 3b). La cantidad de madera considerada que se destina a transformación varía entre 70 y 72 % y los restos de corta entre 28-30 %, dependiendo de si se trata de clara o corta final, respectivamente. Se supuso que cuando se realiza selección de brotes la fracción aprovechada es cero, y en los tres escenarios los restos de corta quedarían en el monte tras el aprovechamiento, permaneciendo sobre el suelo sin ser aprovechados. En el módulo de productos los resultados relativos al escenario 1 y la primera clara se calcularon mediante medición directa, mientras que la información de la segunda clara y la corta final del resto de escenarios se obtuvo mediante consulta a expertos.

Se simularon cinco rotaciones, para poder observar la evolución de la masa en función de las alternativas de manejo propuestas. Por lo tanto, cuando el turno de la corta final

fue de 40 años el periodo de simulación equivale a 200 años, y cuando fue de 60 años el periodo de simulación es hasta los 300 años. Para comparar los resultados de forma homogénea se calcularon los valores medios de los periodos considerados.

Tabla 2. Itinerario selvícola de los escenarios simulados en monte bajo de castaño.

	Edad(años)	Operación selvícola	N _a (pies/ha)	N _d (pies/ha)	Madera para transformación	Restos de corta
Escenario 1 (Línea base)	40	Corta a hecho	1903	-	70 %	30 %
Escenario 2a (T=40 años)	10	Selección de brotes	1903	700	-	100%
	15	Clara	700	325	72 %	28 %
	40	Corta a hecho	325	-	70 %	30 %
Escenario 2b (T=60 años)	10	Selección de brotes	1903	700	-	100%
	15	Clara	700	325	72 %	28 %
	60	Corta a hecho	325	-	70 %	30 %
Escenario 3a (T=40 años)	10	Selección de brotes	1903	700	-	100 %
	15	Clara	700	325	72 %	28 %
	26	Clara	325	180	72 %	28 %
	40	Corta a hecho	180	-	70 %	30 %
Escenario 3b (T=60 años)	10	Selección de brotes	1903	700	-	100 %
	15	Clara	700	325	72 %	28 %
	26	Clara	325	180	72 %	28 %
	60	Corta a hecho	180	-	70 %	30 %

N_a=densidad antes del aprovechamiento, N_d=densidad después del aprovechamiento.

RESULTADOS

Evaluación y validación del modelo

En la comprobación de la capacidad de ajuste del modelo (Figura 2), el análisis de regresión lineal dio como resultado que todos los parámetros de las ecuaciones de biomasa aérea ($R^2=0,37$), radicular ($R^2=0,57$) y total ($R^2=0,50$) fueron significativos, no observándose estos resultados en el suelo ($R^2=0,003$). El análisis gráfico (Figura 2) mostró para la biomasa total, aérea y radicular una sobreestimación del contenido de carbono en edades jóvenes y subestimación en edades más maduras en todos los casos. Sin embargo, en el caso del suelo mostró una ausencia de relación entre los valores predichos y los observados.

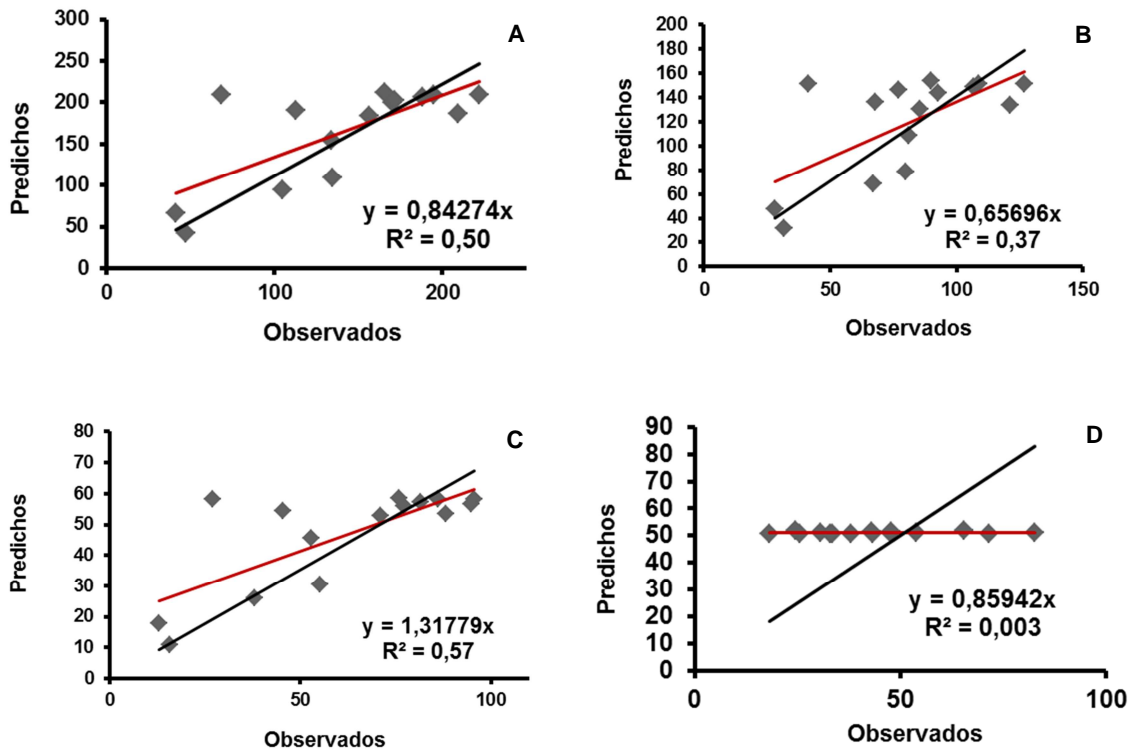


Figura 2. Valores observados frente a predichos para biomasa total (A), biomasa aérea (B), biomasa radicular (C) y suelo (D) en MgC/ha.

Efecto de la simulación en las alternativas de manejo selvícolas

Carbono almacenado en la biomasa, suelo y productos

El carbono almacenado en la biomasa aérea de la línea base fue 119,75 MgC/ha, de los cuales el 79% estuvo almacenado en los fustes (95,08 MgC/ha), el 20,5% en las ramas (24,61MgC/ha) y menos del 1% en las hojas (0,06 MgC/ha). El carbono almacenado en la biomasa radicular fue 48,42 MgC/ha y en el suelo de 131,14 MgC/ha. Los valores del carbono almacenado en el suelo fueron establecidos a partir del cálculo del periodo de retorno de las fracciones de biomasa aérea, siendo 0,06 para el fuste, 0,021 para las ramas y 0,024 para las raíces. En este último caso el modelo obtenido (ecuación 6) para el cálculo de la biomasa radicular en función de la edad, tuvo un $R^2 = 0,82$ con todos sus parámetros significativos y un intervalo de confianza al 95 %.

$$W_{raíz} = 29369,63 * exp^{(t*0,038)} \quad (6)$$

El carbono almacenado en la biomasa aérea y radicular permaneció constante a lo largo del tiempo en todos los escenarios evaluados. Sin embargo, para las alternativas

selvícolas simuladas el carbono almacenado en todas las fracciones de biomasa, disminuyó a medida que aumentó el número de intervenciones selvícolas en la masa, aunque de forma mucho más acusada en el caso del carbono almacenado en el fuste respecto al resto de las fracciones, a excepción del escenario 2b (Figura 3). En este caso, el carbono almacenado en los fustes aumentó significativamente respecto a la línea base y al escenario 2a. Este efecto provocado por el aumento de la edad del turno se observó también en el escenario 3b respecto al 3a, aunque el contenido total de carbono en todas las fracciones (fuste, ramas, hojas y raíces) disminuyó respecto a la línea base (Figura 3).

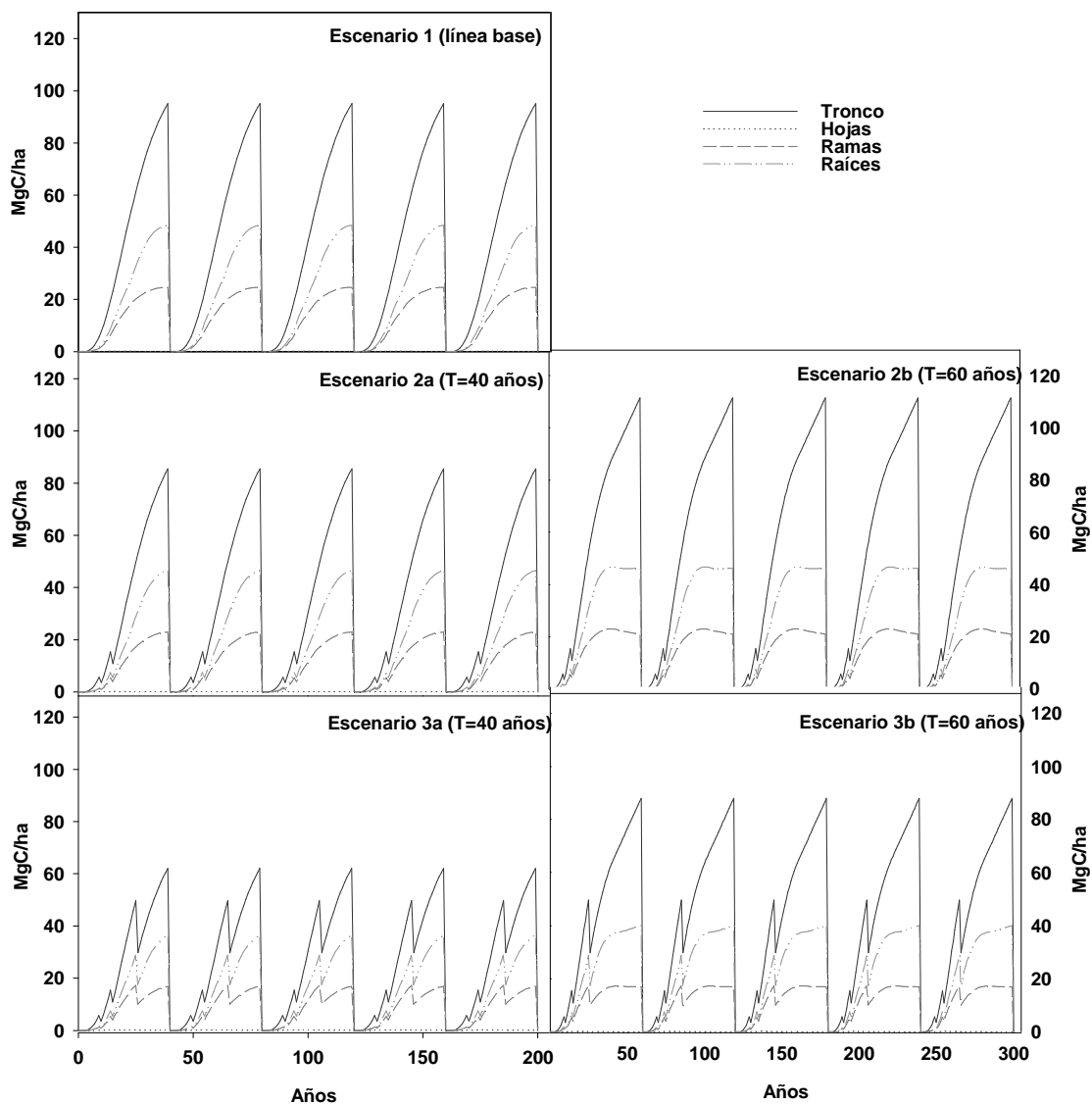


Figura 3. Cantidad total de carbono acumulado en cada una de las fracciones de biomasa en cada escenario evaluado.

En el caso del suelo, se observó una estabilidad a lo largo del tiempo en el carbono almacenado independientemente del escenario evaluado para turnos de corta de 40 años, no observándose un efecto negativo por la realización de las claras. Sin embargo, este efecto no se observó en los escenarios donde se propuso alargar el turno (60 años). En este caso se observó un ligero descenso en el carbono almacenado en el suelo a lo largo del tiempo, siendo más acusado este efecto en el escenario 2b y 3b (Figura 4).

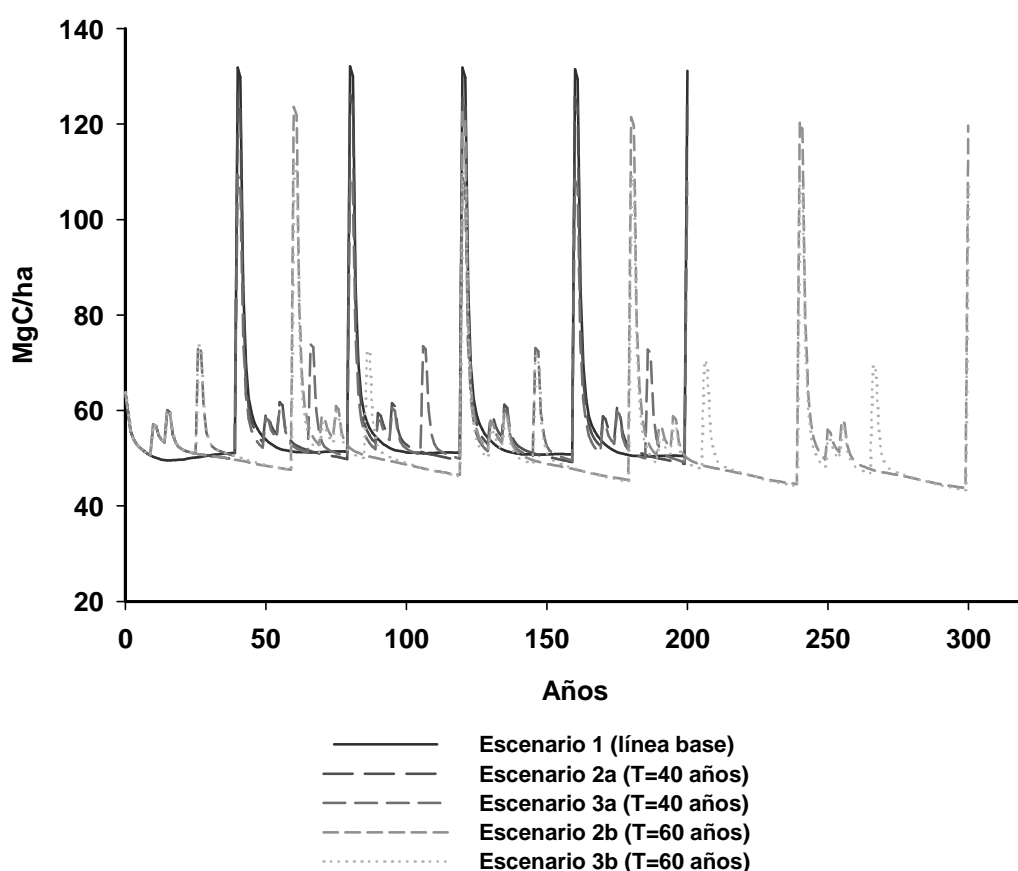


Figura 4. Cantidad total de carbono acumulado en el suelo en cada escenario evaluado.

La fracción de madera destinada a cada uno de los productos que llega al aserradero varió en función del manejo realizado. Los productos de mayores dimensiones fueron el pontón y la viga obtenidos sólo en corta final, mientras que los postes se obtuvieron al realizar las claras, al ser un producto de menores dimensiones. La leña se obtuvo en todos los escenarios evaluados pero en diferentes proporciones en función de las intervenciones selvícolas aplicadas. Los resultados del FRL obtenidos a partir del seguimiento de los productos en aserradero se representan en la Tabla 3. En algunos casos, los subproductos de algunos productos fueron a su vez productos de otras

categorías. A excepción de la leña que está formada por la madera que por imperfecciones no puede ser empleada en otra categoría de producto y es triturada. Para los productos evaluados el FRL decreció en el siguiente orden: leña > poste > pontón > tabla > viga > tablón.

Tabla 3. Factor de recuperación lineal (FRL) de los productos estudiados.

	FRL (%)	Subproducto (Tabla) (%)	Subproducto (Leña) (%)	Residuos (%)
Productos Larga duración				
Viga	37,29	34,19	4,5	24,02
Pontón	40,02	4,32	5,3	50,36
Productos Media duración				
Tabla	38,38	-	12,89	43,46
Tablón	20,89	26,85	6,91	37,55
Poste	57,76	-	42,24	-
Productos Corta duración				
Leña	96,43	-	-	3,57

La realización de claras supuso un porcentaje mayor de madera destinada a productos de mayores dimensiones y de mejor calidad al realizar la corta final, por lo que la cantidad de madera que se destinó a leña al final del turno disminuyó desde la línea base (escenario 1) a los escenarios 2a, 2b, 3a y 3b. En el caso del escenario 3a, en la corta final solo un 5% de la madera fue destinada a leña, incrementándose en un 19 % la madera en otros productos de mayores dimensiones. De esta manera, el porcentaje de madera destinada a la fabricación de productos de larga (viga y pontón) y media (tabla, tablón y poste) duración aumentó un 7 % respectivamente para el escenario 2a y un 9,5 % respectivamente para el escenario 3a, respecto a la línea base (escenario 1) en la corta final. En el caso de los escenarios en los que se alargó el turno aumentó un 8,25% en productos de larga y media duración para el escenario 2b y de un 10,5% para el escenario 3b.

El carbono en los productos maderables, considerando los tres tipos de productos, los residuos y su descomposición en vertedero, aumentó a lo largo del tiempo en todos los escenarios evaluados. En los productos de larga duración el carbono almacenado fue mayor en el escenario 2b (29,00 MgC/ha) que en el resto de los escenarios evaluados (25,27, 27,59, 23,49 y 25,34 MgC/ha, para los escenarios 1, 2a, 3a y 3b, respectivamente). Esto mismo se observó con los productos de vida media (28,37, 31,76, 37,39, 29,70 y 32,96 para los escenarios 1, 2a, 2b, 3a y 3b respectivamente). Sin embargo, los productos de vida corta fueron menores en los escenarios en los que se realizó selección de brotes y claras, manifestándose así el efecto de la clara sobre la calidad de los productos obtenidos (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje destinado a cada producto en función de la intervención selvícola realizada.

	Viga (%)	Pontón (%)	Tabla (%)	Tablón (%)	Poste (%)	Leña (%)
Escenario 1 (Línea base)						
Corta final	32	6	32	6	-	24
Escenario 2a (T=40 años)						
Clara	-	11	10	-	52	27
Corta final	39	6	39	6	-	10
Escenario 2b (T=60 años)						
Clara	-	11	10	-	52	27
Corta final	40,25	6	40,25	6	-	7,5
Escenario 3a (T=40 años)						
1ª Clara	-	11	10	-	52	27
2ª Clara	-	17	20	-	48	15
Corta final	41,5	6	41,5	6	-	5
Escenario 3b (T=60 años)						
1ª Clara	-	11	10	-	52	27
2ª Clara	-	17	20	-	48	15
Corta final	42,5	6	42,5	6	-	3

La Figura 5 muestra la comparación gráfica de todos los escenarios evaluados para los compartimentos estudiados: biomasa, suelo y productos. Al final del periodo del tiempo simulado, a excepción del escenario 2 (T=60 años), se ve claramente como la aplicación de claras provocó una disminución de la cantidad de carbono almacenada en la biomasa (168, 155, 178, 115 y 145 MgC/ha para los escenarios 1, 2a, 2b, 3a y 3b respectivamente). No observándose esta tendencia en el suelo, ya que en este caso la línea base fue la que acumuló más carbono que los escenarios propuestos (131, 125, 119 108 y 107 MgC/ha para los escenarios 1, 2a, 2b, 3a y 3b respectivamente). La cantidad de carbono acumulado en los productos fue mayor en todos los escenarios propuestos (208, 241 y 225 MgC/ha, para los escenarios 2a, 2b y 3b respectivamente) menos en el escenario 3 (T=40 años) (195 MgC/ha) respecto a la línea base (197 MgC/ha). Además, en los dos escenarios en los que se propuso alargar el turno el carbono acumulado en los productos siempre fue mayor desde la primera rotación que en la línea base.

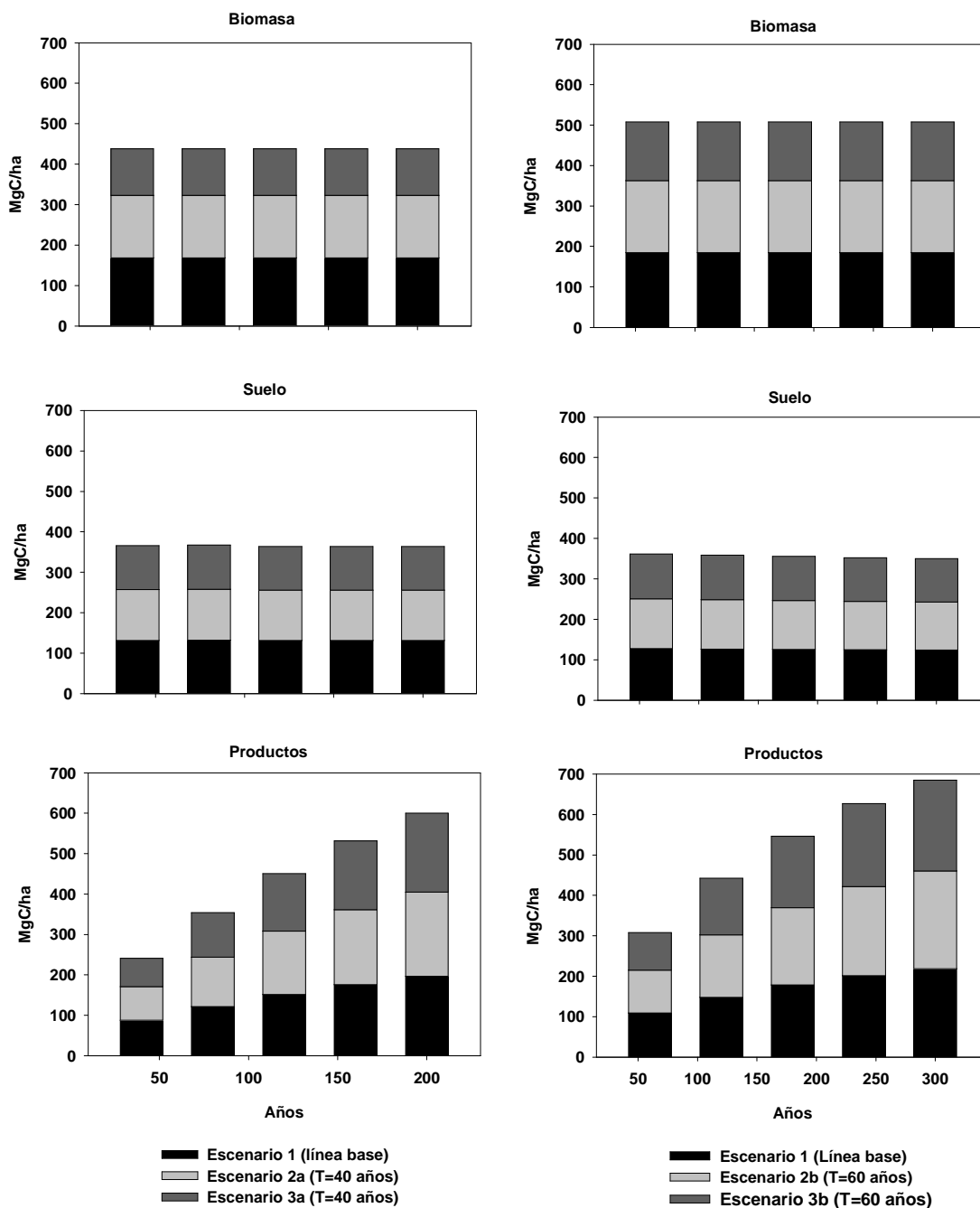


Figura 5. Carbono almacenado en función del manejo forestal en los distintos reservorios de monte bajo de castaño.

Carbono total

El carbono total almacenado a los 200 años teniendo en cuenta, el carbono fijado por la biomasa aérea y radicular, el suelo y la madera extraída fue de 328, 334 y 303 MgC/ha, en la línea base, los escenarios 2a y 3a, respectivamente para la edad de turno de 40 años, y 361 y 333 MgC/ha en los escenarios 2b y 3b con una edad de turno de 60 años. Independientemente de la gestión realizada, el carbono total

almacenado fue aumentando a lo largo del tiempo en los cinco escenarios estudiados, siendo el escenario 2b el que más cantidad de carbono almacenó a los 300 años (Figura 6). Al comparar únicamente los escenarios en los que el turno de corta fue a los 40 años, la línea base de carbono (escenario 1) acumuló más carbono durante las dos primeras rotaciones que el escenario 2a. En la tercera rotación (120 años) la cantidad de carbono acumulada entre el primer y el segundo escenario fue muy similar. Mientras que en la cuarta y quinta rotación (160 y 200 años) el carbono acumulado en el segundo escenario superó a la línea base. El escenario 3a siempre acumuló menos carbono que los otros escenarios. Mientras que si se consideran los dos escenarios en los que se propuso alargar el turno hasta la edad de 60 años, fue el escenario 2b el que desde la primera rotación acumuló más carbono que los otros cuatro escenarios, al acumularse más carbono en los productos, aumentando así el carbono total al alargar el turno en 20 años, tras realizarse únicamente una clara.

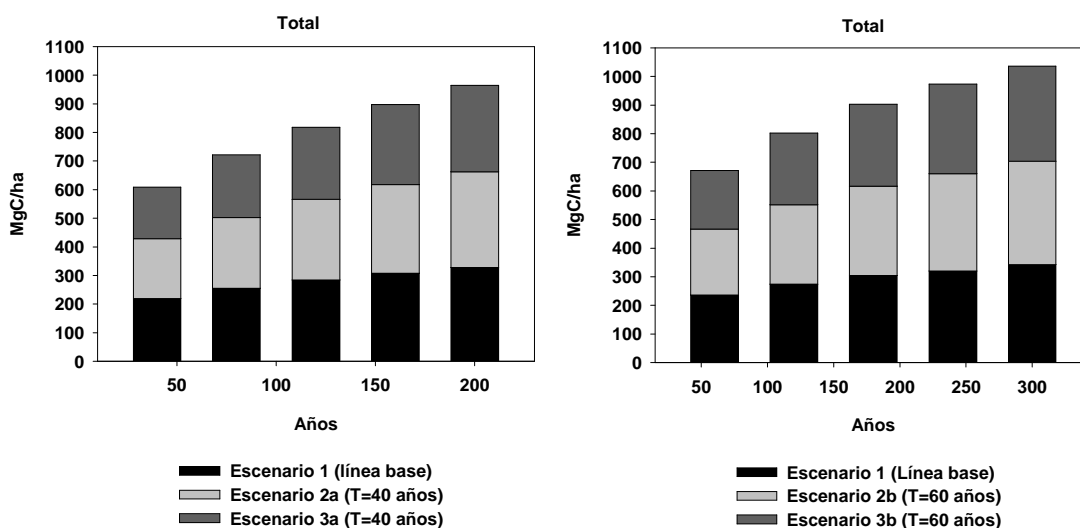


Figura 6. Evolución de la cantidad total de carbono acumulado en el escenario 1, 2a, 2b, 3a y 3b durante el período de simulación con CO2FIX.

Los valores medios de los periodos considerados mostraron la misma tendencia observada con anterioridad para todas las fracciones. La cantidad de carbono total acumulado en la línea base fue superado por los escenarios donde se realizó una única clara (2a y 2b), mientras que los escenarios con dos claras (3a y 3b) siempre acumuló menos carbono que la línea base.

Tabla 5. Valor medio de la cantidad de carbono almacenado en los escenarios simulados.

	Biomasa (MgC/ha)	Suelo (MgC/ha)	Productos (MgC/ha)	Total (MgC/ha)
Escenario 1 (Línea base)	168	131,2	147	279
Escenario 2a (T=40 años)	155	125,4	150,8	276,6
Escenario 2b (T=60 años)	178	121	182,4	304,2
Escenario 3a (T=40 años)	115	108,4	137,8	246,8
Escenario 3b (T=60 años)	145	109	168	277,6

DISCUSIÓN

La simulación de distintos escenarios selvícolas permitió la comparación de diferentes estrategias de manejo forestal para evaluar y explorar el potencial de mitigación del cambio climático de los sistemas forestales de monte bajo de castaño en Asturias. Para ello se estableció una línea base de captura de carbono y otros cuatro escenarios alternativos usando el modelo CO2FIX. El modelo base se ajustó bien a la cantidad de biomasa que acumula el sistema forestal, observándose una relación positiva para la biomasa total. Sin embargo, esta relación no se observó para el carbono del suelo. La ausencia de información sobre la cantidad de carbono presente en la capa orgánica del suelo en las parcelas usadas para la validación, junto con la falta de datos primarios en el periodo de retorno de ramas y raíces para monte bajo de castaño, influyeron en la baja relación observada en la comprobación del ajuste del modelo. Aunque el aporte de las ramas al suelo es una fracción importante en la dinámica de los suelos (Lethonen *et al.*, 2004), son todavía pocos los trabajos realizados en este área. Por este motivo la utilización de valores de periodo de retorno de ramas de monte alto de castaño en este estudio pudo no reflejar la dinámica interna del sistema de monte bajo de castaño. Además el módulo de suelos de CO2FIX usa valores climáticos medios, no reflejando bien la gran variabilidad climática existente dentro del área de estudio. Por todas estas razones la simulación de carbono en suelo debe considerarse con precaución (Maser *et al.*, 2003). Pocos autores han realizado una validación del módulo de suelo debido a la gran dificultad de comparación de resultados, no obteniendo buenas relaciones para especies de eucalipto, aunque si para pino radiata (Pérez-Cruzado *et al.*, 2012).

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se observó una tendencia de estabilización a lo largo del tiempo en los resultados sobre la cantidad de carbono que se acumula en el suelo, al igual que en otros estudios realizados en Europa (Nabuurs

y Schelhass, 2002; Maser *et al.*, 2003). Este hecho es un factor muy importante para poder realizar una gestión forestal sostenible, ya que no se observó una influencia negativa de las claras en el almacenamiento de carbono en el suelo, al igual que han observado otros autores (Ruiz-Peinado *et al.*, 2013).

Los resultados de la validación del módulo de biomasa mostraron una sobreestimación en las edades más jóvenes, debido principalmente a la propia dependencia de modelo en las tablas de producción. Sin embargo, Maser *et al.* (2003) en validaciones del módulo de biomasa encontraron subestimaciones, debido a que usaban datos de bosques no manejados para la validación del modelo, comparándose con la simulación del modelo que si incluía manejo forestal. Mientras que Pérez-Cruzado *et al.* (2012) encontraron sobrestimaciones para pino radiata. Por consiguiente, la parametrización juega un papel importante en este tipo de modelos, debiendo prestar especial atención a la parametrización del fuste, ya que va a influenciar en la mayor parte de los resultados (Nabuurs *et al.*, 2008).

La comparación de los distintos escenarios simulados para monte bajo de castaño, mostró que la aplicación de claras modificó la distribución de carbono en los distintos compartimentos evaluados: biomasa, suelo y productos. La cantidad de carbono almacenado en la biomasa en los escenarios con claras y selección de brotes se vio influenciada tras realizar las intervenciones selvícolas, observándose una disminución de las existencias de biomasa y por tanto de carbono tras realizar las claras. Este hecho se ha observado también en otros estudios con otras especies, tanto de coníferas como de frondosas (Mund & Schulze, 2006; Ruiz-Peinado *et al.*, 2013). Uno de los factores que puede afectar a dicha disminución en el carbono de la biomasa es la calidad de estación. Algunos autores han observado que el potencial de mitigación de los bosques orientados al almacenamiento de carbono puede incrementarse, bajo condiciones de sitio favorables (Profft *et al.*, 2009). De forma que el efecto de la clara sobre la pérdida de la cantidad de carbono acumulado en la biomasa disminuye a medida que aumenta la calidad del sitio al tener una mayor productividad (Pérez-Cruzado *et al.*, 2012), justificándose la realización de intervenciones selvícolas en zonas con índices de sitio altos. Aunque, en sitios con calidades de estación peores una forma de incentivar las intervenciones selvícolas podría ser mediante la valorización del carbono como un servicio ecosistémico. (Bravo *et al.*, 2008a). En futuras investigaciones se plantea estudiar cómo afectará la influencia de la calidad de sitio en monte bajo de castaño.

En el caso de los productos maderables, todos los escenarios alternativos a la línea base mostraron una influencia positiva de las claras en el almacenamiento de carbono,

a excepción del escenario 3b con turno a 60 años. Además, con la realización de claras se consiguió una mayor acumulación de carbono en los productos de larga y media duración que en los de corta. La importancia de este hecho ya fue destacada al observar que cuanto mayor es la proporción de productos de larga duración, mayor es el almacenamiento de carbono. La realización de claras proporciona al árbol mayor esbeltez, lo que supone una mejor calidad de la madera final, permitiendo una mejor utilización de la madera para productos de alto valor con una vida útil más larga (Proft *et al.*, 2009). La importancia del estudio de los productos maderables radica no sólo en su capacidad de almacenamiento de carbono, sino también en el potencial de sustitución de materiales que producen más emisiones de gases de efecto invernadero en su fabricación que la madera (ej. acero, cemento, etc.) (Lippke *et al.*, 2009; Gustavsson & Sathre, 2010). Una evaluación completa del impacto de los bosques en la mitigación del cambio climático debe considerar el carbono almacenado en los productos maderables tras realizar una gestión forestal sostenible y su efecto de sustitución para no subestimar el potencial del sector forestal (Karjalainen *et al.*, 1994).

En este estudio se realizó por primera vez una caracterización completa de los productos maderables en la cadena monte-industria para la realización de claras y corta final de castaño, generando muy buenos resultados debido a la medición directa de los parámetros usados en el modelo. Los distintos productos obtenidos de cada intervención selvícola fueron evaluados directamente en aserradero, obteniendo información primaria para el análisis. Algunos estudios realizados en Europa enfocan el estudio de la cuantificación de carbono en los productos maderables a partir de la cantidad de madera que se procesa en una región, basándose en diversas fuentes de información tales como el aprovechamiento maderero de un lugar, o la dimensión de las trozas (Karjalainen *et al.*, 1994; Profft *et al.*, 2009; Martel, 2010; Mathiue *et al.*, 2012), pero no se ha encontrado ninguno que abarque este tipo de trabajos desde el cálculo del Factor de Recuperación lineal del producto *in situ*, es decir, midiendo la eficiencia del aserradero, y asociándolo posteriormente a la cuantificación de carbono de productos. Este enfoque novedoso requiere de tiempo para su cuantificación pero proporciona datos primarios muy valiosos para poder abarcar el estudio del carbono almacenado en los productos maderables con rigurosidad y detalle.

Otro factor que influye mucho y que es determinante en los resultados del módulo de productos es la vida media asignada a cada uno de los productos. La globalización de los mercados y de los productos de madera hace difícil conocer la trazabilidad del producto, conllevando a una casi ausencia de datos sobre la longevidad de los mismos (Larson *et al.*, 2012). De ahí el amplio rango de variación (20-50 años) en la

asignación de la vida media de los productos de larga duración en otros trabajos (Karjalainen *et al.*, 1994; Profft *et al.*, 2009; Pérez-Cruzado *et al.*, 2012). Por lo tanto, el desarrollo de este tipo de estudios es fundamental para una adecuada caracterización del producto en futuros trabajos.

Los objetivos con los que se plantean las diferentes alternativas selvícolas pueden variar (aprovechamiento maderero, conservación, almacenamiento de carbono, uso recreativo, etc), pero considerando el objetivo de este estudio, que es el de maximizar la acumulación de carbono, de todos los escenarios evaluados los escenarios 3a y 3b no parecen viables desde el punto de vista de acumulación de carbono. A pesar de obtener más productos de larga duración, el carbono total acumulado fue siempre menor que la línea base. Sin embargo, las alternativas planteadas en el escenario 2 si suponen mayor acumulación del carbono total, sobre todo en la opción que plantea alargar el turno (2b). Esta última opción se considera de gran importancia ya que permite una mayor acumulación de biomasa, haciendo que las masas sean capaces de fijar más carbono antes de ser cortadas, coincidiendo con planteamientos propuestos por otras entidades, como por ejemplo el Verified Carbon Standard (VCS, 2013). Diferentes bosques europeos han sido analizados para observar como la aplicación de turnos largos afectaba a la acumulación de carbono, obteniendo como resultado que el aumento de 20 años en la rotación aumenta entre 6-13 % el carbono almacenado total en bosques de pino y entre 14-67 % en bosques de picea (Kaipainen *et al.*, 2004). Por tanto, en este caso el aumento del turno de corta se considera una herramienta eficaz para la gestión de monte bajo de castaño en Asturias, al igual que han observado otros autores en coníferas (*Pinus sylvestris*, *Picea abies*) en Finlandia (Liski *et al.*, 2001; Pussinen *et al.*, 2002), y en castaño en Francia (Martel 2010).

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo en monte bajo de castaño revelan que la aplicación de tratamientos de claras alteran el contenido de carbono total del sistema. Cuando el tratamiento selvícola fue intensivo (más de una clara) se observó una pérdida de carbono respecto a la línea base. Sin embargo, en los escenarios donde sólo se realizó una clara, se observó un pequeño aumento en el carbono total respecto a la línea base, principalmente en el reservorio de productos. Alargar el turno actual en 20 años, proporcionaría un aumento en el carbono total, al permitir un mayor crecimiento en la biomasa. Por lo que un manejo orientado a este tipo de productos serviría para incrementar las existencias de carbono en monte bajo de castaño.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Vergel R, Blanco-González J, Colina-Vuelta A, Fernández-Bustamante C, Fernández-Martínez M, García-de la Fuente L, García-Fernández R, González-Álvarez, J, Roces-Díaz JV, García-Rubio U. 2011. Estrategia regional de aprovechamiento sostenible de la biomasa forestal del Principado de Asturias. Diseño de Programas y Medidas. Gobierno del Principado de Asturias. Consejería de Medio Rural y Pesca; Consejería de Industria y Empleo.

Bravo F, del Río M, Bravo-Oviedo A, Del Peso C, Montero G. 2008a. Forest Management Strategies and Carbon Sequestration. En: *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (Bravo F, LeMay V, Jandl R, von Gadow K). *Managing Forest Ecosystems* 17. pp: 179-194.

Bravo F, Bravo-Oviedo A, Díaz-Balteiro L. 2008b. Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: a modeling approach. *Eur J Forest Res* 127: 225–234.

Cabrera M. 1997. El monte bajo de castaño en Asturias: alternativas selvícolas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

CSIR. 2000. Sinsaw – its use in assisting the timber industry. *Houtim-Pretoria South African Council for Scientific and Industrial Research* (65).

Dahlman RC, Kucera CL. 1965. Root productivity and turnover in native prairie. *Ecol* 46: 84-99.

DGCONA, 2003. Mapa Forestal de España. MFE50. 1:50000. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.

Eggers T. 2002. Implications of wood product manufacturing and utilization for the european carbon budget. European forest institute. Internal Report 9.

FAO. 2001: *Global Forest Resources Assessment 2000. Main report.* FAO Forestry Paper 140.

FAO. 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010.* FAO Forestry Paper 163.

Fernández-Golfín Seco J.I., Álvarez H. 1998. Manual de secado de la madera. Centro de investigación forestal (CIFOR-INIA) Editado AITIM 169 pp.

Gill RA, Jackson RB. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol* 147:13-31.

Groen T, Nabuurs GJ, Schelhaas MJ. 2006. Carbon accounting and cost estimation in forestry projects using CO2FIX v.3. *Climatic change* 747: 269-288.

Gustavsson L, Sathre R. 2011. Energy and CO₂ analysis of wood substitution in construction. *Climatic Change* 105:129–153.

IGME. 2001 Mapa Geológico de España, Asturias. Serie Técnica (E: 1/50.000). Ministerio de Industria, Madrid, Spain.

Kaipainen T, Liski J, Pussinen A, Karjalainen T. 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environ Sci Policy* 7: 205–219.

Karjalainen T, Kellomäki S, Pussinen A. 1994. Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. *Silva Fenn* 28 (2):67-80.

Karjalainen T, Pussinen A, Liski J, Nabuurs GJ, Erhard M, Eggers T, Sonntag M, Mohren GMJ. 2002. An approach towards an estimate of the impact of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget: Germany as a case study. *Forest Ecol Manag* 162 (1): 87-103.

Larson C, Chatellier J, Lifset R, Graedel T. 2012. Role of Forest Products in the Global Carbon Cycle: From the Forest to Final Disposal. En: *Managing Forest Carbon in a Changing Climate* (Ashton MS, Tyrrell ML, Spalding D, Gentry B). Springer Dordrecht Heidelberg London New York. pp: 257-282.

Lehtonen A, Sievänen R, Mäkelä A, Mäkipää R, Korhonen KT, Hokkanen T. 2004. Potential litterfall of Scots pine branches in southern Finland. *Ecol Model* 180: 305–315.

Lippke B, Oneil E, Harrison R, Skog K, Gustavsson L, Stahre R. 2011. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: known and unknowns. *Carbon Manag* 2 (3): 303-333.

Liski J, Pussinen A, Pingoud K, Mäkipää R, Karjalainen T. 2001. Which rotation length is favourable for carbon sequestration. *Can J Forest Res* 31: 2004–2013.

Liski, J, Palosuo, T, Peltoniemi M, Sievänen R. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecol Model* 189: 168-182.

Lizarralde I, Broto M, Rodríguez F, Bravo F. Taper Equations and Wood Products: Assessing the Carbon Flow of the Forest Through Its Products. *Managing Forest Ecosystems: Challenge Climate Change*: 165-177.

Masera OR, Garza-Caligaris JF, Kanninen M, Karjalainen T, Liski J, Nabuurs GJ, Pussinen A, De Jong BHJ, Mohren GMJ. 2003. Modeling carbon sequestration in

afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V. 2 approach. *Ecol Model* 164:177–199.

Martínez-Alonso C, Berdasco L, González L, Martínez S. 2012. Huella de carbono de un producto de madera de Castaño (proyecto piloto en Asturias). *Progreso forestal* 29:35-39.

Martel S. 2010. Carbone et gestion forestière en forêt privée française: Comparaison d'itinéraires sylvicoles de gestion forestière améliorée et perspectives quant à leur valorisation via des projets carbone. Tesis doctoral. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement. Francia.

Mathieu F, Ningre F, Robert N, Frédéric M. 2012. Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. *Forest Ecol Manag* 279: 176–188.

Menéndez-Miguélez M, Canga E, Barrio-Anta M, Majada J, Álvarez-Álvarez P. 2013. A three level system for estimating the biomass of *Castanea Sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain. *Forest Ecol Manag* 291: 417-426.

Montero G, Ruiz-Peinado R, Muñoz M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías Inia: Serie Forestal 13.

Mund M, Schulze ED. 2006. Impacts of forest management on the carbon budget of European beech (*Fagus sylvatica*) forests. *Allg Forst Jagdztg* 177:47–63.

Nabuurs GJ, Schelhaas MJ. 2002. Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecol Ind* 1:213–223.

Nabuurs GJ, Van Putten B, Knippers TS, Mohren GMJ. 2008. Comparison of uncertainties in carbon sequestration estimates for a tropical and a temperate forest. *Forest Ecol Manag* 256: 237-245.

Ninyerola M, Pons X, Roure JM. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.

Patricio MS, Nunes LF, Pereira EL. 2012. Litterfall and litter decomposition in chestnut high forest stands in northern Portugal. *Forest Syst* 2: 259-271.

Pérez-Cruzado C, Mohren GMJ, Merino A, Rodríguez-Soalleiro R. 2012. Carbon balance for different management practices for fast growing tree species planted on former pastureland in southern Europe: a case study using the CO₂fix model. *Eur J Forest Res*: 1695-1716.

- Profft I, Mund M, Weber GE, Weller E, Schulze ED. 2009. Forest management and carbon sequestration in wood products. *Eur J Forest Res* 128:399–413.
- Protocolo de Kyoto. 1998. Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas.
- Pussinen A, Karjalainen T, Mäkipää R, Valsta L, Kellomäki S. 2002. Forest carbon sequestration and harvest in Scots pine stand under different climate and nitrogen deposition scenarios. *Forest Ecol Manag* 158: 103–115.
- Ruiz-Peinado R, Montero G, del Rio M. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Syst* 21: 42-52.
- Ruiz-Peinado R, Bravo-Oviedo A, López-Senespleda E, Montero G, Río M. 2013. Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pinewoods?. *Eur J Forest Res* 132:253–262.
- SADEI. 2011. Anuario estadístico de Asturias. Instituto Asturiano de Estadística. Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, Spain.
- SAS Institute Inc. 2004a. SAS/STAT®. 9.1. User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Saxton KE, Rawls WJ, Romberger JS, Papendick RI. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci Soc Am J*.50 (4): 1031-1036.
- Schelhaas MJ, van Esch PW, Groen TA, de Jong BHJ, Kanninen M, Liski J, Masera O, Mohren GMJ, Nabuurs GJ, Palosuo T, Pedroni L, Vallejo A, Vileín T. 2004. CO2FIX V 3.1 A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Alterra, Wageningen.
- UNECE, FAO. 2011: State of Europe's Forests 2011. Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe.
- VCS. 2013. Verified carbon standard. A global benchmark of carbon. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) Requirements.
- Vega A. 2013. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Castanea sativa* Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos. Tesis doctotal. Universidad de Santiago de Compostela.
- Wade M, Bullard S, Steele P, Araman P. 1992. Estimating hardwood sawmill conversion efficiency based on sawing machine and los characteristics. *Forest Prod J* 42: 21-26.