

# MODELIZACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS FORESTALES: EFECTO DE LA ELECCIÓN DE ESPECIE

SUSANA PÉREZ PÉREZ<sup>1</sup>, ROBERT JANDL<sup>2</sup> Y AGUSTÍN RUBIO SÁNCHEZ<sup>3</sup>

## RESUMEN

Las masas forestales juegan un papel importante en la fijación de carbono atmosférico, motivo por lo que se han desarrollado distintos métodos con los que evaluar el comportamiento que tendrán los sistemas forestales bajo distintas situaciones. En este trabajo se utiliza un modelo, el CO2FIX v.3.1, con el que pretendemos comparar la capacidad de secuestrar carbono de tres sistemas forestales comunes en centroeuropa: bosques de picea (*Picea abies*), de roble (*Quercus robur x petraea*) y de pino albar (*Pinus sylvestris*). Para ello hemos centrado nuestra atención en una localidad del sur de Austria donde la vegetación existente es una masa mixta de picea y roble. Con los datos disponibles del crecimiento de las especies forestales de esta localidad, así como con sus datos climáticos y edáficos, se pretende averiguar cómo y cuánto cambia la captura de carbono en el caso de utilizar únicamente especies de crecimiento rápido o de crecimiento lento. A pesar de que se pudiera esperar que las especies de crecimiento rápido pudieran dar lugar a una mayor fijación de carbono, el resultado obtenido en este estudio es que el roble, especie de crecimiento lento, fija más carbono. Además, el modelo pronostica que la cantidad de carbono fijado en el suelo de la masa mixta objeto de este estudio será mayor a lo largo del tiempo que en el de la masa monoespecífica.

**Palabras clave:** Fijación de carbono, modelo de simulación, bosque, suelo.

## SUMMARY

Forests play an important role in the sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub>. Several approaches for their behaviour at specific situations are available. We used the simulation model CO2FIX v.3.1 for the estimation of the carbon sequestration potential of common central European forest types, i.e. Norway spruce (*Picea abies*), pine (*Pinus sylvestris*) and oak forests (*Quercus robur x petraea*), respectively. The site for our case study is located in southern Austria that is currently stocked with a mixed-species forest of spruce and pine. The carbon sequestration of rapidly and slowly growing forest types at the site was estimated based on available data of the productivity, the climate and the local soil properties. In this study we found that the slowly growing oak forest in this area

<sup>1</sup> TECMENA S.L., Clara del Rey, 22, 1ºB. E-28002. Madrid. susanaperezp@hotmail.com.

<sup>2</sup> Centro de Investigación Forestal (BFW), Seckendorff-Gudent Weg 8, A-1131 Viena, Austria. robert.jandl@bfw.gv.at

<sup>3</sup> Dpto. Silvopascicultura. E.T.S.I. de Montes. U.P.M. Ciudad Universitaria, s/n. E-28040. Madrid. agustin.rubio@upm.es

Recibido: 21/02/2007.

Aceptado: 20/06/2007.

captures more carbon than the more vividly growing spruce and pine forests. The simulation suggests that mixed-species forests of this study accumulate more soil carbon than mono-species forests.

**Key words:** Carbon fixation, simulation model, forest, soil.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático o calentamiento global es un fenómeno observado ya de manera incuestionable y ligado a todas luces al importante y rápido aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. La causa fundamental de este incremento de los GEI en la atmósfera son las actividades humanas que están alterando notablemente la composición original de la atmósfera (IPCC 2007). Los GEI, por un lado, permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta pero, por otro lado, también absorben y reemiten parte de la radiación infrarroja que el planeta devuelve al espacio exterior, incrementando con ello la cantidad de calor atrapado en la atmósfera. Entre estos GEI destacan: el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el ozono (O<sub>3</sub>), el dióxido de azufre y los clorofluorocarbonos (CFC). El CO<sub>2</sub> es el principal GEI, responsable del 71,5% del mismo (SCHNEIDER 1989; HOUGHTON & WOODWELL 1989; DIXON *et al.* 1994; MASERA 1995 a y b).

Desde 1979, año en que tuvo lugar la primera Conferencia Mundial sobre el Clima, uno de los objetivos comunes de las actuales políticas globalizadoras es tanto reducir las emisiones de G.E.I. (Gases de Efecto Invernadero) a la atmósfera, como intentar capturar la mayor cantidad posible de los mismos. En este camino destacan tres hitos: en 1988 la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en 1992 la adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (en inglés UNFCCC) y en 1997 la adopción del conocido Protocolo de Kioto. Dicho Protocolo compromete a los países desarrollados a alcanzar una serie de objetivos, relativos a la reducción de

emisiones de GEI, cuantificados por primera vez, estableciendo para ello una serie de instrumentos que lo permitan de un modo efectivo y con costes asumibles. Uno de estos instrumentos es contabilizar los cambios en los reservorios de carbono (C) debido a actividades de «Uso de la tierra, Cambio de uso de la tierra y Selvicultura», donde aparecen implicadas las actividades de forestación, reforestación y deforestación (Artículo 3.3 del Protocolo de Kioto), así como la gestión forestal, gestión de tierras agrícolas, gestión de pastizales y revegetación (Artículo 3.4).

La adopción del Protocolo de Kioto está obligando a la comunidad científica a trabajar en la estimación de las cantidades de CO<sub>2</sub> que los sistemas forestales son capaces de incorporar y de emitir a la atmósfera, mediante estudios en los que se valoran las posibilidades de aumentar y mantener la fijación de C de los ecosistemas forestales. Pero, también está obligando a los gestores forestales a incorporar un objetivo más a sus actuaciones selvícolas: la fijación de C en las masas forestales. Uno de los muchos trabajos que pueden ilustrar este tipo de estudios es el realizado por VALSTA (2006). En España también podemos encontrar ya algunos interesantes trabajos en los que se estudia la cantidad de C que se puede acumular en distintos sistemas forestales (por ejemplo, BOGINO *et al.* 2006, ponen su atención en el Sistema Central; mientras que MONTERO *et al.* 2005, hacen un recorrido por las especies más importantes de España). Para medir los cambios de C fijado, en función de las distintas actuaciones realizadas, se requieren medidas a lo largo del tiempo, motivo por el que este tipo de trabajos todavía no aportan demasiada información. En este punto es donde la *modelización* se convierte en una herramienta muy útil que ayuda a entender los efectos de inter-

acción de distintos factores, como el cambio del clima o las actuaciones de manejo, en las existencias de C del sistema forestal.

La simulación del crecimiento de los bosques se lleva a cabo tanto con modelos empíricos, como con modelos basados en procesos. Los primeros se utilizan para la toma de decisiones de gestión en los sistemas forestales, sobre todo cuando se requieren datos específicos obtenidos de los inventarios existentes. En estos modelos empíricos se supone que las condiciones climatológicas del futuro serán las mismas que las del pasado. Sin embargo, lo contrario ocurre con los modelos basados en procesos, que se fundamentan en procesos fisiológicos controlados por factores climáticos y edáficos (GARCÍA-GONZALO *et al.* 2006). Hasta el momento, el uso de estos modelos ha sido limitado ya que, por lo general, tienen una estructura compleja y es necesaria una descripción detallada de las características de la zona y de los árboles. Estas circunstancias, que limitan el uso de estos modelos para el manejo diario, sin embargo son necesarias para entender y predecir cómo crecerán y se desarrollarán los bosques bajo supuestos cambios en determinadas condiciones medioambientales y de manejo. Estos modelos se apoyan en el hecho de que el C participa en la composición de todas las estructuras de los vegetales: follaje, ramas y tronco (que constituyen la parte aérea) y raíces (parte subterránea). Además, parte del C queda también almacenado en el suelo.

Partiendo de esta idea, se han desarrollado diferentes modelos que pretenden cuantificar la cantidad de CO<sub>2</sub> que entra en juego en los sistemas forestales. Uno de los más asequibles es el CO2FIX, modelo utilizado en este estudio. Pero se pueden citar otros muchos como el GOTILWA+ del CREAM, el GLOB-3PG (SOARES *et al.* 2006), el modelo FINNFOR (GARCÍA-GONZALO *et al.* 2006), etc. Con el modelo CO2FIX V.3.1. se puede estimar el comportamiento de una masa forestal en relación a la fijación de C bajo distintas condiciones, como la especie forestal dominante, las actividades selvícolas, el clima y las características del suelo. La ventaja del CO2FIX en com-

paración con otros modelos, es la simplicidad de su parametrización. En este trabajo se pretenden alcanzar los siguientes objetivos: (1) observar la variación de la fijación total de C en función de la especie arbórea del área forestal y (2) determinar si esas variaciones en la fijación del C se localizan en la parte del subsistema correspondiente al arbolado o en la del suelo. Para ello, se estudia un caso concreto para comprobar si especies forestales de crecimiento rápido, como picea o pino, permiten una fijación mayor de C que las de crecimiento lento, como el roble.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### El modelo CO2FIX

El modelo de fijación de carbono CO2FIX permite estimar el C que una masa forestal es capaz de albergar en distintos compartimentos: biomasa aérea, suelo y productos de madera. Para ello efectúa una simulación del ciclo del C en rodales forestales sometidos a gestión selvícola. El modelo fue creado por Morhen y Goldewijk (MORHEN *et al.* 1999) en el Instituto de Investigaciones Forestales y de Ecología Urbana de Holanda, en 1990, gracias a una iniciativa de la Unión Europea en la que participaron, además de Finlandia (Instituto Europeo Forestal de Finlandia, EFI) y de Holanda (ALTERRA), países como México (Instituto de Ecología de la Universidad Nacional de México) y Costa Rica (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Inicialmente fue concebido para masas monoespecíficas y regulares (MORHEN & KLEIN, 1990; NABUURS & MOHREN 1995; ORDÓÑEZ 1998; DE JONG *et al.* 1999).

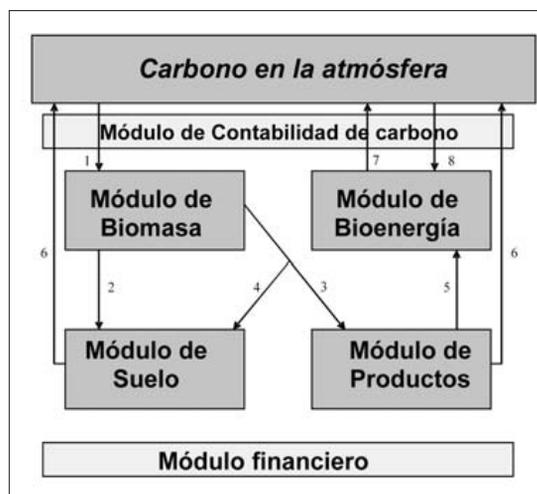
El modelo original, programado en Fortran 77, fue mejorado y adaptado a interfaces gráficas usando Borland C++ por el Laboratorio de Bioenergía del Instituto de Ecología de la UNAM (México) y el Instituto Forestal y de Investigación Natural de Holanda, generándose así la versión 1.2. del

modelo CO2FIX para Windows (para más detalles ver MOHREN *et al.* 1997). El modelo se ha seguido mejorando dando lugar a distintas versiones más flexibles y aplicables a distintas situaciones. La versión 2, por ejemplo, permitió analizar masas mixtas e irregulares, y pudo ser aplicada a diferentes sistemas forestales, incluso a sistemas agroforestales y a silvopastorales. Además, en esta versión, se podía estudiar la evolución en los distintos *rodales* dentro de una misma masa, entendiendo como *rodal* un grupo de árboles independientes, o un grupo de especies de crecimiento similar, que se tratan como una unidad (ALDER & SILVA 2000). También permitía considerar sistemas selectivos de corta, así como la mortalidad inducida por las actuaciones selvícolas. Dicha versión 2 estructura el programa en tres módulos principales: el de *Biomasa*, el de *Suelo* y el de *Productos*, y los resultados se presentaban tanto en forma de tabla, como gráficamente. En la última versión que se ha desarrollado del modelo, la versión 3.1, que es la que se va a emplear en este trabajo, el modelo es capaz de simular los reservorios y los flujos de C en los bosques (biomasa del tronco, ramas, raíces y hojas), en el suelo y en los productos de madera, en caso de masa forestal gestionada. A ello añade capacidades para estimar los costes e ingresos y los créditos de C que se podrían ganar bajo distintos sistemas de contabilidad de créditos permitidos en el protocolo de Kioto (ver Figura 1). Todos estos resultados (almacenes, flujos, costes, ingresos y créditos) son expresados por hectárea y en periodos de tiempo de un año.

Entre las ventajas más destacadas del programa CO2FIX se encuentra el hecho de que para su funcionamiento hacen falta un conjunto de parámetros que normalmente se obtienen con facilidad: climáticos (temperaturas y precipitaciones), edáficos (del tipo de residuos orgánicos, la proporción de los componentes químicos de dichos residuos,...), o selvícolas (cortas realizadas en la masa, edad a la que se realizan las cortas, intensidad de la intervención, clasificación de la biomasa

extraída en distintos tipos –madera de sierra, para tableros, pasta o papel, bioenergía,...–, etc.). El programa incluso permite trabajar en ausencia de alguno de estos parámetros con las opciones por defecto. El trabajo que aquí se muestra se ha centrado fundamentalmente en los módulos de *Biomasa* y de *Suelo*, no habiéndose considerado las posibilidades que ofrecen los módulos de *Productos* y *Bioenergía*.

En el **módulo de biomasa** el dato que es necesario introducir para cada uno de los rodales es la producción de madera en volumen por hectárea (información de la que normalmente se puede disponer con facilidad en forma de tablas de crecimiento). Si se multiplica este dato por la densidad de la madera de cada especie vegetal y por el contenido de C se



**Figura 1.** Módulos del CO2FIX V.3.1. Los cuadros gris oscuro son los módulos interrelacionados por los flujos de C. En gris claro son los módulos de contabilización del C. Las flechas representan flujos de C: 1. Producción; 2. Caída de residuos; 3. Aprovechamientos, cortas; 4. Residuos debidos a las cortas. Mortalidad debida a las actuaciones selvícolas; 5. Quema y obtención de energía de los productos; 6. Descomposición; 7. Emisiones; 8. Emisiones evitadas. Fuente: Manual de uso del CO2FIX V.3.1. (SCHNELHAAS *et al.* 2004)

**Figure 1.** Modules of CO2FIX V.3.1. The dark-grey boxes represent interrelated modules of C fluxes. The light-grey boxes are the modules of C accounting. The arrows are C fluxes: 1. Productivity; 2. Litter fall; 3. Harvest; 4. Harvest residues, natural mortality and thinning; 5. Fuel-wood production; 6. Decomposition; 7. Emissions; 8. Avoided emissions. Source: CO2FIX V.3.1. User's manual (SCHNELHAAS *et al.* 2004)

obtiene la cantidad de C presente en el apartado *madera del tronco*. Para el resto de los apartados de la biomasa (raíces, ramas y hojas) la captura de C es calculada por el crecimiento relativo a la producción de madera y sus respectivos contenidos de C. Los restos de biomasa debidos al aporte de materia orgánica al suelo (por muerte de hojas, ramas y raíces), bien por mortalidad natural o bien por mortalidad debido a las actividades selvícolas, se tendrán en cuenta en el MÓDULO DE SUELO; mientras que la madera extraída será considerada en el MÓDULO DE PRODUCTOS.

En el **módulo de suelo** se utiliza el modelo Yasso (LISKI *et al.* 2003) que describe la descomposición y la dinámica del C en suelos bien drenados. Por ahora, esta versión contempla las existencias totales de C en el suelo, sin hacer distinción entre los distintos horizontes del mismo. Lo que sí permite es introducir valores relacionados con la calidad de los componentes químicos de los residuos; es decir, las proporciones de compuestos solubles, holocelulosas y compuestos de lignina que contienen los distintos tipos de residuos (no leñosos, de madera fina y de madera gruesa). Es posible introducir estos datos manualmente si se conocen, aunque el programa pone a disposición del usuario dos grupos por defecto, uno correspondiente a coníferas y otro a frondosas. Además, es en este MÓDULO DE SUELO donde habrá que introducir los datos climáticos. Los parámetros que pide el modelo son: (1) la suma de las temperaturas (siempre que superen los 0°C) de todos los días del año, en grados centígrados, (2) la precipitación del período vegetativo, en milímetros y (3) la evapotranspiración potencial en el periodo vegetativo, también expresada en milímetros.

El CO2FIX puede calcular la temperatura de los días que superan los cero grados y la evaporación potencial, a partir de los datos de las temperaturas medias mensuales, pudiéndose especificar también los meses del periodo vegetativo, siendo estos datos

normalmente fáciles de obtener en cualquier zona de Europa.

### Área de estudio

En este trabajo se pretende estudiar el funcionamiento del modelo utilizando datos de Dobrowa, localidad situada en la provincia de Carinthia, en el sur de Austria (46°07'N, 14°39'E). El terreno es llano, de una altitud aproximada de 460 metros. La precipitación en el periodo vegetativo (de Mayo a Septiembre) es de 540 milímetros. Las temperaturas medias y las precipitaciones mensuales (datos del Servicio Meteorológico de Austria) son las que se muestran en la Tabla 1.

En la actualidad el área de estudio está ocupada por una masa forestal mixta de picea (*Picea abies* L. (Karsten)) y roble (*Quercus robur* L. *x* *petraea* (Mattuschka) Liebl.). Sin embargo, la zona estaba anteriormente ocupada por una masa monoespecífica de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). En Austria, la clase de productividad se mide a través del crecimiento medio total a la edad de 100 años, e incluye la biomasa eliminada en las claras intermedias. Las masas de rendimiento más alto son de clase 15;

Meses	T (°C)	P (mm)
Enero	- 4,2	3
Febrero	- 1,4	40
Marzo	3,9	12
Abril	8,8	106
Mayo	13,6	57
Junio	17,1	75
Julio	19,0	124
Agosto	18,3	187
Septiembre	14,6	97
Octubre	9,0	117
Noviembre	2,6	99
Diciembre	- 2,4	66

**Tabla 1.** Datos termométricos y pluviométricos mensuales de «Dobrowa».

**Table 1.** Monthly air temperature and rainfall data from the experimental site «Dobrowa».

la clase 10 se considera de rendimiento medio; y las bajas son las menores de 5. La media de Austria es 7, teniendo en cuenta zonas de gran altitud, donde el rendimiento es bajo. En la zona de Dobrowa la clase de productividad correspondiente a picea es 10 (valor medio). La productividad del roble es de la clase 6 (productividad baja-media) y la del pino silvestre de la clase 7 (también baja-media) (MARSCHALL, 1975). Además, hay que tener en cuenta que la madera del roble tiene una densidad de 0,58 toneladas de materia seca por m<sup>3</sup>, mayor que la picea y el pino, cuyos valores son de 0,40 y 0,42 toneladas de materia seca por m<sup>3</sup> respectivamente (DIETZ, 1975). En esta zona, tanto picea como pino silvestre tienen turno de 100 años, mientras que para el roble el turno es de 120 años. Los tratamientos selvícolas de estas tres especies quedan reflejados en la Tabla 2, con indicación del año en el que se realiza la intervención y el porcentaje de la fracción extraída con respecto a la masa total.

En relación al MÓDULO DE SUELO del área de estudio, los datos necesarios para el funcionamiento del modelo son las proporciones de compuestos solubles, holocelulosas y

compuestos de lignina, que contienen los distintos tipos de residuos. Es habitual no disponer de estudios suficientes que aporten esta detallada información. Por ello hemos valorado la variación en el resultado final del modelo que supondría modificar las magnitudes de estos compuestos solubles y se ha comprobado que dichos cambios son mínimos con los otros datos ya comentados de Dobrowa. Por tanto, hemos utilizado los valores que el modelo proporciona por defecto para coníferas y para frondosas (Tablas 3 y 4, respectivamente).

### Método

Para el trabajo desarrollado en Dobrowa se han considerado los datos mencionados en el apartado anterior de temperaturas, precipitaciones y actuaciones selvícolas. A partir de ellos se han definido tres escenarios distintos de trabajo en función de la especie forestal dominante:

- Escenario 1: masa forestal mixta de picea y roble, que actualmente es la presente en el área de estudio.

<i>Picea abies</i>		<i>Quercus robur x petraea</i>		<i>Pinus sylvestris</i>	
Año	Fracción extraída	Año	Fracción extraída	Año	Fracción extraída
30	8 %	40	20 %	35	20 %
60	30 %	70	50 %	60	40 %
100	100 %	120	100 %	100	100 %

**Tabla 2.** Fracción extraída con los diferentes tratamientos selvícolas de las masas forestales en Dobrowa.

**Table 2.** Fraction of removed stem volume in thinning operations at assigned dates for the experimental site Dobrowa.

Proporciones	Compuestos solubles	Holocelulosas	Ligninas
No leñoso	0.27	0.51	0.22
Madera fina	0.03	0.65	0.32
Madera gruesa	0.03	0.69	0.28

**Tabla 3.** Proporciones (en tanto por 1) de compuestos solubles, holocelulosas y ligninas en residuos de coníferas.

**Table 3.** Composition of the residues of coniferous trees with respect to soluble components, cellulose, and lignin.

Proporciones	Compuestos solubles	Holocelulosas	Ligninas
No leñoso	0.38	0.36	0.26
Madera fina	0.03	0.65	0.32
Madera gruesa	0.03	0.75	0.22

**Tabla 4.** Proporciones (en tanto por 1) de compuestos solubles, holocelulosas y ligninas en residuos de frondosas.

**Table 4.** Composition of the residues of deciduous trees with respect to soluble components, cellulose, and lignin.

- **Escenario 2:** masa monoespecífica de pino (*Pinus sylvestris*), que es la que ocupaba la zona anteriormente
- **Escenario 3:** masa compuesta exclusivamente por roble.

Con estos tres escenarios se pretende contrastar la hipótesis previamente formulada de que los sistemas forestales dominados por especies forestales de crecimiento rápido, como picea o pino, permiten una fijación mayor de C que las dominadas por especies de crecimiento lento, como el roble.

## RESULTADOS

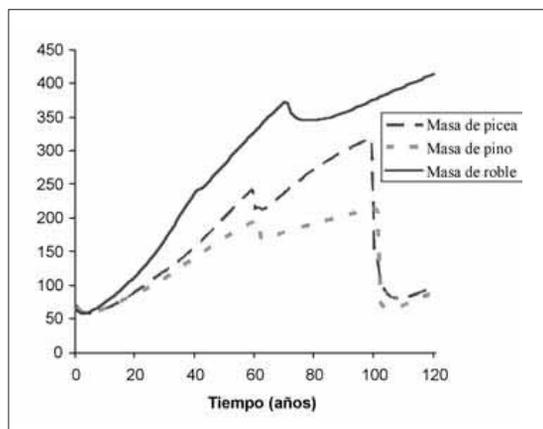
En la Figura 2 se muestran los valores de la fijación total de C, es decir, teniendo en cuenta conjuntamente el C fijado por la biomasa aérea y subterránea, el fijado por el suelo, además de la madera extraída, para tres masas monoespecíficas de los árboles objeto de estudio: de picea, de pino y de roble, según la selvicultura aplicada en la zona (ver Tabla 2).

En dicho gráfico se puede comprobar como hecho más destacable que las masas domina-

das por especies de crecimiento más rápido que el roble no son las que muestran mayores valores en la fijación total de C, sino que son las masas de roble las que fijan de manera global más cantidad de C, en contra de lo que inicialmente se pudiera esperar de una especie con menor crecimiento. A los 100 años de edad la masa de pino presenta su máximo valor en cuanto a fijación total de C (213,2 MgC/ha); mientras que la masa de roble a esta edad captura una cantidad total de C de 375,0 MgC/ha, y continúa aumentando la fijación hasta el momento de la corta final, a los 120 años. En las masas de picea toma un valor intermedio (de 317 MgC/ha a los 100 años).

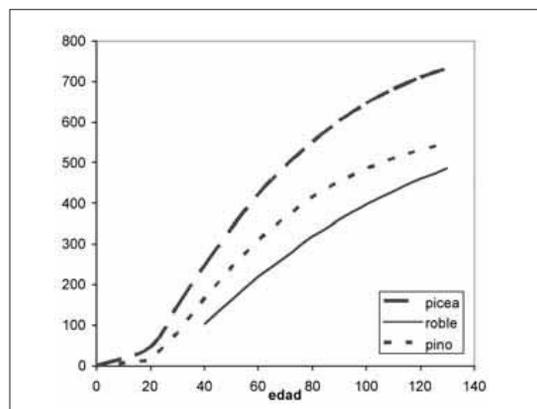
En el siguiente gráfico (Figura 3), se puede observar el distinto crecimiento en volumen de las especies consideradas (picea, pino y roble) a lo largo del tiempo. El mayor crecimiento corriente de las coníferas es el motivo por el que, en principio, se podía esperar una mayor capacidad de éstos para fijar C, tal y como se apuntaba en la hipótesis de partida que atribuía una mayor capacidad para fijar C al sistema dominado por picea o por pino en comparación con los robledales.

Los gráficos de las Figuras 4, 5 y 6 permiten comparar los resultados de fijación total de



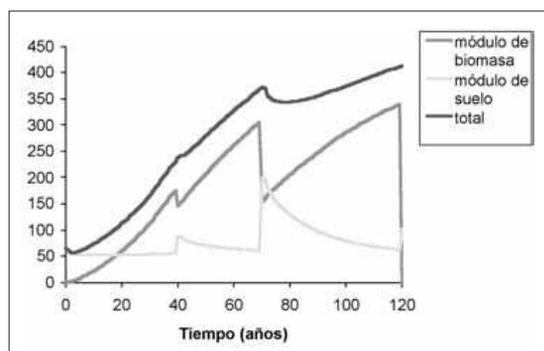
**Figura 2.** Fijación total de carbono de masas forestales en Dobrowa.

**Figure 2.** Total fixation of C in the forest stands at the experimental site Dobrowa.



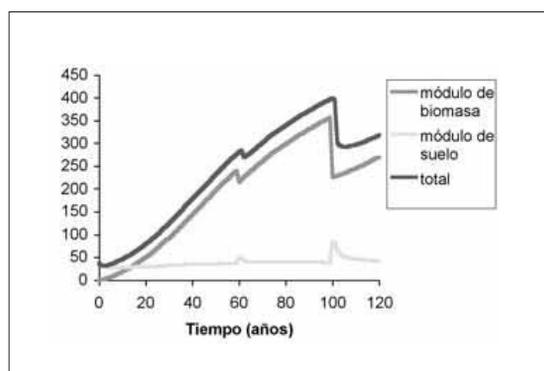
**Figura 3.** Crecimiento en volumen de picea, roble y pino en Dobrowa según la selvicultura aplicada en Dobrowa.

**Figure 3.** Standing stock of stem volume for spruce, oak and pine at the experimental site Dobrowa in the applied forest management scheme.



**Figura 4.** Fijación de carbono de una masa monoespecífica de roble en Dobrowa.

**Figure 4.** Fixation of carbon in a single-species oak forest at the experimental site Dobrowa.

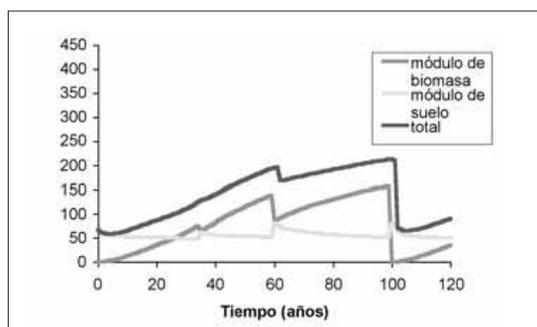


**Figura 5.** Fijación de carbono en Dobrowa para una masa mixta de picea y roble.

**Figure 5.** Fixation of carbon in a mixed-species spruce-oak forest at the experimental site Dobrowa.

C con los que se obtienen en el MÓDULO DE BIOMASA y en el MÓDULO DE SUELO para las distintas masas forestales.

Con la gestión de la masa de roble que se realiza en Dobrowa a los 70 años se realiza una corta intermedia que supone la retirada del 50% de la biomasa, y se constata un aumento brusco e importante en la fijación de C registrado por el MÓDULO DE SUELO (Figura 4). Ello hace que, a pesar de la importante disminución en la fijación de C registrado por el MÓDULO DE BIOMASA, la estimación total del C apenas lo acuse, puesto que es rápidamente contrarrestada por la fijación recogida en el MÓDULO DE SUELO. Aunque en las masas monoespecífi-



**Figura 6.** Fijación de carbono de una masa monoespecífica de pino en Dobrowa.

**Figure 6.** Fixation of carbon in a single-species pine forest at the experimental site Dobrowa.

cas de pino y en las mixtas de picea y roble también se observan efectos semejantes (Figuras 5 y 6) debido a sus respectivas cortas intermedias, el comportamiento de la fijación de C registrada por el MÓDULO SUELO es bastante más constante que en el caso anterior. El ligero repunte observado en el C capturado en el suelo y registrado por el MÓDULO DE SUELO se debe principalmente a la acumulación de residuos (hojarasca fresca, ramillos, etc.) procedentes de la actuación selvícola, que son de rápida descomposición, y, por tanto, no implica un efecto importante a largo plazo.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los bosques del planeta cubren hoy en día cerca de 4.000 millones de hectáreas, el equivalente a un 30 por ciento de la superficie terrestre, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (F.A.O. 2006). Además de las tradicionales funciones productoras, recreativas y protectoras de estos ecosistemas, los sistemas forestales desempeñan un importante papel en el ciclo global del C. A escala planetaria los bosques son sumideros de CO<sub>2</sub>, es decir sirven de almacén de C, fijado en forma de biomasa, siendo esta cantidad de unas 283 gigatoneladas (Gt), aunque en

período 1990-2005 se ha comprobado un descenso anual de 1,1 Gt (F.A.O., 2006). Sin embargo, valorar la capacidad de estos sistemas para fijar C es una tarea para la que hace falta desarrollar estudios a largo plazo y en ocasiones sobre bosques que hoy en día no existen. Motivo por el que la modelización se convierte en un poderoso instrumento para el estudio de estos procesos.

En el área de estudio, en el pasado, las masas forestales estuvieron dominadas por *Pinus sylvestris* y hoy en día lo están por *Picea abies* y *Quercus robur x petraea*. En el actual contexto social son muchos los que abogan porque se favorezca al roble, en un intento por promocionar la sucesión natural que permita la reconquista de la vegetación potencial. Todo ello nos configura una multiplicidad de escenarios en los que valorar la contribución de cada uno de los distintos sistemas forestales al secuestro del C en el ciclo general de este elemento. El CO2FIX nos ofrece la posibilidad de llevar a cabo dicha valoración, dado que ha sido utilizado en diferentes ecosistemas forestales del mundo: desde bosques tropicales lluviosos hasta bosques boreales, pasando por bosques templados. Se ha aplicado a diversos sistemas silviculturales: en las montañas centrales de Europa con *Picea abies* (abeto noruego o picea noruega), en el Pacífico noroeste de los Estados Unidos con *Pseudotsuga menziessii* (abeto de Douglas), en Brasil con *Pinus elliottii* (abeto Slash), en Brasil y Venezuela con *Pinus caribaea* (pino caribbea), en Nueva Zelanda y Australia con *Pinus radiata* (pino radiata), etc. (ver NABUURS & MOHREN 1993).

Una vez realizado el estudio, y a la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que en esta zona estudiada, el roble, especie de crecimiento lento (de clase de productividad 6), fija más C que especies de crecimiento más rápido, como el pino o la picea (cuyas clases de productividad son 7 y 10 respectivamente). Además, el C fijado en el módulo de suelo por la masa mixta permanece más estable a lo largo del tiempo que en la masa monoespecífica.

El hecho de que sean las masas dominadas por roble las que manifiesten una mayor capacidad para fijar C de manera global hay que atribuirlo a que el roble, aunque tiene un crecimiento más lento, su madera es más densa, lo cual no sólo compensa el menor crecimiento, sino que incluso hace que el C fijado finalmente sea mayor.

Además, teniendo en cuenta que la picea y, en menor medida, el pino se caracterizan por tener mucho tronco y algunas acículas, mientras que la estructura del roble tiene mucho tronco y también muchas ramas, se puede observar que la masa dominada por roble, a pesar de presentar una velocidad de crecimiento menor que las otras dos especies, consigue una mayor fijación global de C (Figuras 2 y 3), lo que hace este sistema muy interesante desde este punto de vista.

Estos datos obtenidos son interesantes a la hora de plantearse la gestión de un área determinada, ya que, a pesar de que en algunos aspectos pueda parecer más adecuada la regeneración de un zona con especies de crecimiento rápido, teniendo en cuenta estos resultados, y desde el punto de vista de maximizar la fijación de C, es más apropiado utilizar otras especies de menor rendimiento (como el roble) o, mezcla de distintas especies (como picea y roble). Por otro lado, como el modelo permite considerar distintos rodales dentro de un área forestal determinada, así como sistemas selectivos de corta y de la mortalidad inducida por las actuaciones selvícolas, resulta una buena herramienta para predecir el comportamiento que tendrá la masa forestal.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha visto la luz gracias a la Acción Integrada Hispano-Austríaca titulada Descomposición acelerada del Carbono del suelo en sistemas forestales de montaña por el cambio climático (Referencia HU2005-0023) del Ministerio de Educación y Ciencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALDER, D. & SILVA, J.N.M. 2000. An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management* 130: 141-157.
- BOGINO, S., BRAVO OVIEDO, F. & HERRERO, C. 2006. Carbon dioxide accumulation by pure and mixed woodlands of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pyrenaica* Willd. in Central Mountain Range (Spain). Proceedings of the IUFRO Div. 4 International Meeting «Managing Forest Ecosystems: the challenges of Climate Change». Ed. Cuatroelementos, Valladolid, Spain. 98 pp.
- DE JONG, B., CAIRNS, M.A., AIRNS, N., RAMÍREZ-MARCIAL, OCHOA-GAONA, S., MENDOZA-VEGA, J., HAGGERTY, P.K., GONZÁLEZ-ESPINOSA, M. & MARCH-MIFSUT, I. 1999. Land-use change and carbon flux between the 1970s and 1990s in the central highlands of Chiapas. Mexico. *Environmental Management* 23 (3):373-385.
- DIETZ P. 1975. Dichte und Rindengehalt von Industrieholz. *Holz Roh- Werkstoff* 33: 135-141.
- DIXON, R.K., BROWN, S., HOUGHTON, R.A., SOLOMON, A.M., TREXLER, M.C. & WISNIEWSKI, J. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- F.A.O. 2006. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible. Estudio FAO: Montes 147. Capítulo 2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2006.
- GARCÍA-GONZALO, J., JÄGER, D., LEXER, M., PELTORLA, H., BRICEÑO-ELIZONDO, E. & KELLOMÄKI, S. 2006. Optimisation of forest management under current and changing climate: a case of study of a finish management unit. ). Proceedings of the IUFRO Div. 4 International Meeting «Managing Forest Ecosystems: the challenges of Climate Change». Ed. Cuatroelementos, Valladolid, Spain. 98 pp.
- HOUGHTON, R.A. & WOODWELL, C.M. 1989. Global Climate Change. *Scientific American* 260 (4): 36-40.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/docs/WG1AR4\\_SPM\\_PlenaryApproved.pdf](http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/docs/WG1AR4_SPM_PlenaryApproved.pdf).
- LISKI, J., NISSINEN, A., ERHARD, M. & TASKINEN, O. 2003. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology* 9(4): 575-584.
- MARSCHALL, J. 1975. *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung*. Österreichischer Agrarverlag, Vienna.
- MASERA, O. 1995a. Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forests: Methodological Considerations and Results. *Interciencia*, 20 (6): 388-395.
- MASERA, O. 1995a. Los Bosques y El Cambio Climático Global. Universidad de México, 536-537, 43-47.
- MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R. & MUÑOZ, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Monografías del INIA: Serie Forestal 13, 270 pp.
- MORHEN, G.M.J., GARZA, J.F., MASERA, O., KANNINEN, M., KAGJALAINEN, T., PUSSINEN, A. & NABUURS, G.J. 1999. CO<sub>2</sub>FIX For Windows: a Dynamic Model of the CO<sub>2</sub>-Fixation in Forests; Version 1.2. Research Report 99.
- MORHEN, G.M.J., GARZA-CALIGARIS, J.F., MASERA, O. & NABUURS, G.J. 1997. User's Manual CO<sub>2</sub>FIX For Windows: a Dynamic Model of the CO<sub>2</sub>-Fixation in Forest Stands Version 1.2. Research Report-Instituto de Ecología de la UNAM. 26 pp.
- MOHREN, G.M.J. & KLEIN, C.G.M. 1990. CO<sub>2</sub> FIX: A Dynamic Model of The CO<sub>2</sub> Fixation in Forest Stands. Report NR. 624, Research Institute For Forestry and Urban Ecology, Wageningen.
- NABUURS, G.J. & MOHREN, G.M.J. 1993. Carbon Fixation Through Forestation Activities: a Study of the Carbon Sequestering Potential of Selected Forest Types, Commissioned by the

- Foundation Face. Report Ibn 93/4. Institute for Forestry and Nature Research, Forests Absorbing Carbondioxyde Emission. Netherlands. 206 pp.
- NABUURS, G.J. & MOHREN, G.M.J. 1995. Modelling analysis of potential carbon sequestration in selected forest types. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1157-1172.
- NABUURS, G.J., GARZA-CALIGARIS, J.F., KANNINEN, M., KARJALAINEN, T., LAPVETELAINEN, T., LISKI, J., MASERA, O. MOHREN, G.M.J., PUSSINEN, A. & SCHELHAS, M.J. 2001. Manual of a model for quantifying carbon sequestration en forest ecosystems and wood products. Alterra Report, Wageningen.
- ORDÓÑEZ, A. 1998. El modelo CO2FIX. Memorias del Taller de Metodologías para la Evaluación de la Captura de Carbono en el Área Forestal. México, D.F., Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP.
- SCHNEIDER, S.H. 1989. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243(10): 271-281.
- SCHNELHAAS, M.J., VAN ESCH, P.W., GROEN, T.A., DE JONG, B.H.J., KANNINEN, M., LISKI, J., MASERA, O., MOREN, G.M.J., NABUURS, G.J., PALOSNO, T., PEDRONI, L. VALLEJO, A. & VILÉNT, T. 2004. CO2FIX V 3.1. a modelling framework for quantifying carbon sequestration en forest ecosystems. Wageningen, Alterra, Alterra Rapport 1068. 122 pp.
- SOARES, P., TOMÉ, M., BORGES, J.G., OLIVERA, T., LOFF, J., ARAÚJO, C., PINA, J.P., LEMOS, L., SOUSA, C. & FEITH, H. 2006. Modelling pulpwood and carbon sequestration sustainability of eucalyptus plantations at landscape level). Proceedings of the IUFRO Div. 4 International Meeting «Managing Forest Ecosystems: the challenges of Climate Change». Ed. Cuatroelementos, Valladolid, Spain. 98 pp.
- VALSTA, L. 2006. Carbono en bosques y en productos de madera para mitigar el cambio climático). Proceedings of the IUFRO Div. 4 International Meeting «Managing Forest Ecosystems: the challenges of Climate Change». Ed. Cuatroelementos, Valladolid, Spain. 98 pp.

