

LÍNEA BASE DE CARBONO EN BOSQUE MIXTO DE PINO-ENCINO DE LA SIERRA JUÁREZ (OAXACA, MÉXICO). APLICACIÓN DEL MODELO CO2FIX V.3.2

CARBON BASELINE IN A MIXED PINE-OAK FOREST IN THE JUAREZ MOUNTAIN RANGE (OAXACA, MEXICO) USING THE CO2FIX V.3.2 MODEL

Sergio Álvarez^{1,2*}; Agustín Rubio¹

¹Departamento de Silvopascicultura, ETSI de Montes, Ciudad Universitaria, s/n. C. P. 28040. Madrid, España.

²Instituto de Ciencias Ambientales, Sistema de Universidades del Estado de Oaxaca. Universidad de la Sierra Juárez. Av. Universidad, s/n. C. P. 68725. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. Correo-e: sergio.alvarez@upm.es (*Autor para correspondencia).

RESUMEN

Las masas forestales juegan un papel fundamental en el secuestro de carbono (C). Se han desarrollado numerosos métodos y modelos para estimar los reservorios y los flujos de C presentes en los ecosistemas. En este estudio se utilizó el modelo de simulación CO2FIX v.3.2 con el fin de determinar la línea base de C en un bosque de pino-encino de la Sierra Juárez, Oaxaca, México. El primer objetivo fue comparar los resultados del modelo con los resultados obtenidos mediante muestreos directos y el uso de ecuaciones alométricas. El segundo objetivo fue identificar los elementos que conforman dicha línea base de C para una posible evaluación de un nuevo manejo forestal que incluye beneficios ambientales por secuestro de C. Tras la obtención de los datos y la comparación de resultados con los estudios previos se concluyó que el modelo CO2FIX v3.2 es capaz de determinar, de manera simple y eficaz, los reservorios y los flujos de C, así como la línea base de C. Esto proporciona a las comunidades con acceso limitado a recursos económicos una herramienta capaz de evaluar la capacidad para el secuestro de C y recibir apoyo en el marco del servicio ambiental del secuestro de C.

PALABRAS CLAVE: Secuestro de carbono, estimación de biomasa, ecuaciones alométricas, reservorios.

ABSTRACT

Forest stands play a key role in carbon (C) sequestration. Numerous methods and models have been developed to estimate the carbon reservoirs and flows present in these ecosystems. In this study, the CO2FIX v.3.2 simulation model was used to analyse the C baseline in a pine-oak forest in the Juarez Mountain Range ("Sierra Juarez"), Oaxaca, Mexico. The first aim was to compare the results of this model with results obtained by direct sampling and allometric equations. Moreover, a second objective was to identify the elements which constitute the C baseline for a possible assessment of further forestry management which includes the environmental service of C sequestration. Once the data were obtained and results compared with previous studies, it was found that the CO2FIX v3.2 model is capable of determining the C reservoirs and flows in these ecosystems simply and efficiently, thereby enabling estimation of the C baseline. This provides communities with limited economic resources access to a tool which is capable of assessing the ability to sequester C and receive support as part of the environmental service of C sequestration.

KEYWORDS: Carbon sequestration, biomass estimation, allometric equations, reservoirs.



Recibido: 16 de enero de 2012
 Aceptado: 08 de febrero de 2013
 doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.01.005
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la población mundial se ha cuadruplicado y el consumo mundial de recursos y las emisiones de desechos han llegado a un punto en que actualmente la humanidad consume a un ritmo más rápido que el tiempo que tarda la tierra en recuperarse (Haberl et al., 2007; Hoekstra, 2009; Wackernagel et al., 2002; Fondo Mundial para la Naturaleza, Red de la Huella Global, & la Sociedad Zoológica de Londres [ZSL, por sus siglas en inglés], 2012). Por consiguiente, los bosques tropicales se talan más rápido de lo que se pueden regenerar (13 millones de hectáreas destruidas por año) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [UNEP por sus siglas en inglés], 2007). Las emisiones de gases de efecto invernadero se están acumulando en la atmósfera, lo que provoca cambios climáticos y posibles efectos negativos en la salud de los ecosistemas (Butchart et al., 2010).

Los ecosistemas forestales almacenan más del 80 % de todas los reservorios de carbón (C) terrestres en el suelo (Jandl et al., 2006; Six et al., 2002). El intercambio anual de C entre los bosques y la atmósfera mediante la fotosíntesis y la respiración es aproximadamente de 50 Pg-año⁻¹, es decir, siete veces la emisión de C antropogénico (Brown et al., 1996). La magnitud de este fenómeno destaca la importancia del manejo adecuado de los ecosistemas forestales como un enfoque alternativo adecuado para compensar las crecientes emisiones de CO₂ antropogénico en la atmósfera. Por esta razón, es de vital importancia medir los flujos y los reservorios de C (Sheinbaum & Masera, 2000).

De acuerdo con Powlson, Whitmore, y Goulding (2011), el secuestro de C es el proceso que permite un incremento en los reservorios de C de un ecosistema con una transferencia adicional de C de la atmósfera y, por lo tanto, una contribución verdadera a la mitigación del cambio climático. Los gestores forestales han sido guiados tradicionalmente por parámetros técnicos relacionados con la producción de madera, pero ahora están siendo alentados a incorporar otros factores ambientales como la conservación de la riqueza biológica y el secuestro de C en sus criterios de manejo. Sin embargo, existe una falta de conocimiento práctico disponible con respecto a las prácticas forestales y los medios de afrontar estos nuevos retos (Rubio et al., 2010). Con respecto al secuestro de C, esta situación podría resolverse mediante el suministro de información sobre la evolución de los reservorios de C en las masas forestales, ya que los gestores forestales son capaces de modificar algunos de los factores (es decir, temperatura del suelo, humedad del suelo, claros de luz) que los afectan.

En el presente estudio, la línea base de C es el valor de los reservorios de C presentes en las masas mixtas estudiadas, suponiendo un uso de suelo tradicional en el área sujeto a ninguna intervención antrópica, conocida como "bosque no manejado". Este valor de línea base debe ser tomado como referencia para compararlo con los escenarios de manejo u

INTRODUCTION

Over the last century, the world population has quadrupled and global resource consumption and waste emissions have grown to a point where humanity now consumes at a faster pace than the Earth can regenerate (Haberl et al., 2007; Hoekstra, 2009; Wackernagel et al., 2002; WWF International, Global Footprint Network, & Zoological Society of London [ZSL], 2012). Therefore, tropical forests are cut faster than they can regrow (13 million ha destroyed per year) (United Nations Environment Programme [UNEP], 2007). Greenhouse gas emissions are accumulating in the atmosphere causing climatic changes and potential negative impacts on the health of ecosystems (Butchart et al., 2010).

Forest ecosystems store more than 80 % of all terrestrial aboveground carbon (C) stocks (Jandl et al., 2006; Six et al., 2002). The annual C exchange between forests and the atmosphere via photosynthesis and respiration is about 50 Pg-year⁻¹, i. e. seven times the anthropogenic C emission (Brown et al., 1996). The magnitude of this phenomenon underlines the importance of the correct management of forestry ecosystems as an appropriate alternative approach to offset the rising emissions of anthropogenic CO₂ into the atmosphere. For this reason, measuring the flows and stocks of C in the forest is of vital importance (Sheinbaum & Masera, 2000).

According to Powlson, Whitmore, and Goulding (2011), C sequestration is the process which enables an increase in the C reservoirs of an ecosystem with an additional C transfer from the atmosphere and thus a genuine contribution to climate change mitigation. Forest managers have traditionally been guided by technical parameters relating to wood production, but they are now being encouraged to incorporate other environmental factors such as the conservation of biological richness and C sequestration into their management criteria. However, there is a conspicuous lack of practical knowledge available regarding forestry practices and the means of meeting these new challenges (Rubio et al., 2010). Regarding C sequestration, this situation could be tackled by providing information about the evolution of C stocks in forest stands, as forest managers are able to alter some of the factors (i. e. soil temperature, soil moisture, light gaps) affecting them.

In this study the C baseline is the value of the C reservoirs present in the studied mixed stand, assuming a traditional land use in the area which is subject to any anthropic intervention, named "non-managed forest". This baseline value must be taken as a reference for comparison with management scenarios or other sets of environmental conditions which may be used as alternative scenarios. Moreover, establishing the baseline for an ecological system is a compulsory first step for any project involving an increase in C sequestration. The first studies estimating C reservoirs in forest ecosystems and the exchange flows both inside and outside these systems were conducted in the 80's, by deter-

otros conjuntos de condiciones ambientales, que pueden ser utilizados como escenarios alternativos. Por otra parte, el establecimiento de la línea base para un sistema ecológico es un primer paso obligatorio para cualquier proyecto que implique un aumento en el secuestro de C. Los primeros estudios que estimaron los reservorios de C en los ecosistemas forestales y el intercambio de flujos, tanto dentro como fuera de estos sistemas, se realizaron en los años 80 mediante la determinación de una serie de ecuaciones alométricas (Brown & Lugo, 1984; Seiler & Crutzen, 1980). Al ajustar estas ecuaciones mediante un muestreo directo se permite determinar la cantidad de C, que un sistema forestal es capaz de asimilar en un tiempo determinado. Sin embargo, estos modelos sólo eran aplicables a una especie en particular y una zona específica, y por lo tanto, no fueron muy representativos. Por este motivo, a finales del siglo XX se realizaron mayores esfuerzos para desarrollar y estandarizar nuevos modelos de simulación, que comparten algunas de las desventajas de las ecuaciones alométricas, pero ofrecen un mayor alcance, que podrían analizar los reservorios de C y los flujos en ecosistemas forestales más complejos. Los ejemplos de estos modelos incluyen CBM-CFS (Kurz, Apps, Webb, & McNamee, 1993), BIOME3 (Haxeltine & Prentice, 1996), HYBRID 3.0 (Friend, Stevens, & Knox, 1997), 3-PG (Landsberg & Waring, 1997), FINNFOR (Kellomaki & Vaisanen, 1997), GOTILWA+ (Gracia, Tello, Sabaté, & Bellot, 1999) and CO2FIX (Mohren & Klein, 1990). Sin embargo, ninguno de estos modelos de simulación fue ampliamente aceptado como un modelo estándar en los proyectos de secuestro de C en los sistemas forestales. Actualmente, numerosos trabajos siguen basándose en las ecuaciones alométricas debido al debate sobre su fiabilidad. Por ello, se requieren de estudios que comparen los resultados con aquellos obtenidos mediante el muestreo directo y las ecuaciones alométricas, para evaluar las mejoras y validar los nuevos modelos de simulación del ciclo de C. El modelo CO2FIX v3.2 (Masera et al., 2003; Schelhaas et al., 2004) simula reservorios y flujos de C en los bosques bien drenados, puros y mixtos de todo el mundo. Las ventajas más significativas incluyen el hecho de que se requiere una serie de parámetros simples relacionados con el clima (temperaturas medias mensuales y precipitación en la época de crecimiento), el suelo (entradas anuales de C, tipo de residuos orgánicos), el crecimiento de la biomasa (incremento corriente anual, las tasas de rotación y el crecimiento de las ramas, follaje y raíces relacionado con el crecimiento del fuste) y el manejo forestal (plan de cortas, gestión de la mortalidad, clasificación de la biomasa extraída de acuerdo a su destino). Estos principales parámetros son generalmente fáciles de obtener y el modelo puede incluso ser utilizado a falta de algunos de dichos parámetros mediante opciones por defecto.

En México se han realizado diversos estudios basados en el modelo CO2FIX (Cairns, Barker, Shea, & Haggerty, 1995; De Jong et al., 1995; De Jong, Masera, Olguin, & Martínez, 2007), aunque ninguno de ellos se ha aplicado a las características particulares, ya sea climáticas o del suelo, que predominan en la Sierra Juárez, en el norte del estado de

mining a series of allometric equations (Brown and Lugo, 1984; Seiler & Crutzen, 1980). Adjusting these equations by means of direct sampling permits a determination of the quantity of C that a forest system is capable of assimilating in a given time. However, these models were only applicable to one particular species and a specific zone, and were thus not very representative. For this reason, major efforts were made in the late 20th century to develop and standardise new simulation models which share some of the disadvantages of the allometric equations but offer a greater scope which could analyse the C reservoirs and flows in more complex forest ecosystems. Examples of these models include CBM-CFS (Kurz, Apps, Webb, & McNamee, 1993), BIOME3 (Haxeltine & Prentice, 1996), HYBRID 3.0 (Friend, Stevens, & Knox, 1997), 3-PG (Landsberg & Waring, 1997), FINNFOR (Kellomaki & Vaisanen, 1997), GOTILWA+ (Gracia, Tello, Sabaté, & Bellot, 1999) and CO2FIX (Mohren & Klein, 1990). However, none of these simulation models were widely accepted as a standard model in C sequestration projects in forest systems. Due to the debate about their reliability, numerous works today continue to be based on allometric equations. To assess the improvements and validate the new models for simulation of the C cycle, studies which compare the results with those obtained through direct sampling and allometric equations are needed. The CO2FIX v3.2 (Masera et al., 2003; Schelhaas et al., 2004) simulates stocks and fluxes of C in well-drained, pure and mixed worldwide forests. The most significant advantages include the fact that it requires a series of simple parameters relating to climate (mean monthly temperatures and precipitation in growing season), soil (mean annual C input, type of organic residues), biomass growth (current annual increment, turnover rates, foliage, root and branch growth relative to stem growth) and forest management (thinning-harvest operations, management mortality, classification of the biomass extracted according to its destination). These principal parameters are usually easy to obtain and the model can even be used in the absence of certain of these parameters by default options.

Various studies based on the CO2FIX model have been carried out in Mexico (Cairns, Barker, Shea, & Haggerty, 1995; De Jong et al., 1995; De Jong, Masera, Olguin, & Martínez, 2007), although none of them has been applied to the particular characteristics –either climatic or soil– prevailing in the Juárez Mountain Range, in the north of the state of Oaxaca. The Juárez Mountain Range is one of the zones where temperate, cloud and tropical forests are in an excellent state of conservation (Lorence & García-Mendoza, 1989). The commercial exploitation of the pine-oak forest is the primary –and sometimes only– economic resource for the local communities (Garibay-Orijel, Martínez-Ramos, & Cifuentes, 2009). This geographic environment offers an interesting opportunity for the comparison of the CO2FIX model estimates with the more time consuming and laborious works based on allometric equations carried out in the Juárez Mountain Range (Díaz-Franco et al., 2007; Etchevers-Barra, Vargas-Hernández, Acosta-Mireles, &

Oaxaca. La Sierra Juárez es una de las zonas donde los bosques templados, nubosos y tropicales se encuentran en un excelente estado de conservación (Lorence & García-Mendoza, 1989). La explotación comercial de los bosques de pino-encino es la principal, y y en algunas ocasiones, la única fuente económica para las comunidades locales (Garibay-Orijel, Martínez-Ramos, & Cifuentes, 2009). Este entorno geográfico ofrece una oportunidad interesante para la comparación de las estimaciones del modelo CO2FIX con trabajos de mayor duración y dificultad basados en las ecuaciones alométricas realizadas en la Sierra Juárez (Díaz-Franco et al., 2007; Etchevers-Barra, Vargas-Hernández, Acosta-Mireles, & Velázquez-Martínez, 2002; Roncal-García, Soto-Pinto, Castellanos-Albores, Ramírez-Marcial, & De Jong, 2008). De acuerdo con Masera, Bellon, y Segura (1997), los proyectos que involucran el secuestro de C pueden ser herramientas efectivas para el empoderamiento social y político de las pequeñas comunidades en el sur de México. La aportación del conocimiento técnico para la explotación forestal sostenible puede ofrecer a las comunidades locales herramientas que les permitan incrementar el valor de sus recursos naturales, y basar su propio desarrollo en la explotación racional de su entorno. El bosque de pino-encino es el tipo de vegetación natural, que tiene la mayor importancia para la producción forestal en México, ya que 76 % de la producción de madera del país proviene de los bosques naturales de pino-encino (De Jong et al., 2007). El desarrollo de las comunidades de la Sierra Juárez depende de la explotación de este tipo de bosque; su gran biodiversidad, que puede tener hasta 55 especies de pino y 200 especies de encino (Myers, Mittermeier, Da Fonseca, & Kent, 2000), les permite predominar sobre una amplia gama de condiciones ecológicas. Las distintas especies de pino y encino se mezclan en proporciones muy variables. En el estrato superior del bosque de pino-encino, las especies con la mayor distribución y abundancia son *Pinus oaxacana* Mirov., *P. pseudostrobus* Lind., *P. patula* Schiede y Deppe, y *P. rudis* Endl., que alcanzan alturas máximas de entre 30 y 40 m. En el estrato bajo, con alturas de hasta 20 m, se encuentran principalmente los encinos *Quercus crassifolia* Humb. y Bonpl., *Q. rugosa* Née y *Q. laurina* Humb. y Bonpl., que pueden estar presentes en cantidades similares a las de los pinos. En el mismo entorno se encuentran las especies latifoliadas *Arbutus xalapensis* Kunth., *Alnus acuminata* Kunth., *Prunus serótina* Ehrh. y *Cercocarpus macrophyllus* Schneid.

Este trabajo pretende cumplir dos objetivos: en primer lugar, comparar los resultados de la simulación de reservorios y flujos de C utilizando el modelo CO2FIX v3.2 en los bosques de pino-encino de la Sierra Juárez con otros resultados obtenidos mediante el muestreo directo y la aplicación de ecuaciones alométricas; y en segundo, identificar los elementos que comprenden la línea base en estos bosques para una posible evaluación de un manejo forestal posterior, que incluye el servicio ambiental de secuestro de C.

Velázquez-Martínez, 2002; Roncal-García, Soto-Pinto, Castellanos-Albores, Ramírez-Marcial, & De Jong, 2008). According to Masera, Bellon, and Segura (1997), projects involving C sequestration can be effective tools for the social and political empowerment of small communities in southern Mexico. Contributing technical knowledge for sustainable forestry exploitation can provide local communities with tools which enable them to enhance the value of their natural resources and to base their own development on the rational exploitation of their environment. The pine-oak forest is the natural vegetation type which has the greatest importance to forestry production in Mexico, as 76 % of the country's wood production comes from natural pine-oak forests (De Jong et al., 2007). The development of communities in the Juarez Mountain Range depends on the exploitation of this kind of forest; the enormous biodiversity of these forests, which may have as many as 55 species of pine and 200 species of oak (Myers, Mittermeier, Da Fonseca, & Kent, 2000), enables them to predominate over an extensive range of ecological conditions. The different species of pine and oak are mixed in widely varying proportions. In the upper stratum of the pine-oak forest, the species with the greatest distribution and abundance are *Pinus oaxacana* Mirov., *P. pseudostrobus* Lind., *P. patula* Schiede and Deppe, and *P. rudis* Endl., which reach maximum heights of between 30 and 40 m. In the lower stratum, with heights of up to 20 m, are the oaks, primarily *Quercus crassifolia* Humb. and Bonpl., *Q. rugosa* Née and *Q. laurina* Humb. and Bonpl., which may be present in numbers similar to the pines. Living alongside them are broad-leaved species *Arbutus xalapensis* Kunth., *Alnus acuminata* Kunth., *Prunus serotina* Ehrh. and *Cercocarpus macrophyllus* Schneid.

This work aims to fulfil two objectives: first, to compare the results of the simulation of reservoirs and flows of C using the CO2FIX v3.2 model in the pine-oak forests of the Juarez Mountain Range with other results obtained by means of direct sampling and application of allometric equations surveys; and second, to identify the elements which comprise the C baseline in these forests for a possible assessment of further forestry management which includes the environmental service of C sequestration.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was conducted taking the following four communities as a representation of the Juarez Mountain Range: La Trinidad (17° 18' N-96° 07' W), Santiago Xiacuí (17° 18' N-96° 10' W), Capulálpam de Méndez (17° 18' N-96° 27' W) and Santiago Comaltepec (17° 48' N-96° 33' W). Figure 1 shows their geographic location. The total area of the four communities is 24,996 ha. The height above sea level varies between 200 and 3,250 m, although most of the territory is located at an altitude of between 1,000 and 2,500 m. 88 % of the total study area is used for forestry;

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se realizó tomando las siguientes cuatro comunidades como una representación de la Sierra Juárez: La Trinidad (17° 18' N-96° 07' W), Santiago Xiacuí (17° 18' N-96° 10' W), Capulálpam de Méndez (17° 18' N-96° 27' W) y Santiago Comaltepec (17° 48' N-96° 33' W). En la Figura 1 se muestra su ubicación geográfica. El área total de las cuatro comunidades es de 24,996 ha. La altura sobre el nivel del mar oscila entre 200 y 3,250 m, aunque la mayoría del territorio se encuentra a una altitud de entre 1,000 y 2,500 m. El 88 % del área total de estudio se utiliza para la silvicultura; de esta área, el 60 % es bosque protegido (bosques no manejados), el 39 % se destina a la producción comercial, y sólo el 1 % pertenece a las áreas degradadas en restauración. La temperatura anual media es de 15.2 °C y la precipitación anual total es de 1,115.6 mm; el periodo de mayor precipitación se extiende de junio a octubre. Estos datos climáticos provienen de la estación meteorológica más cercana, que se localiza en el Rancho Texas (17° 19' N-26° 27' W; 2,230 m), a menos de 5 km del área de estudio, en el municipio de Capulálpam de Méndez. El principal tipo de suelo es acrisol húmico (Unión de Comunidades Productoras Forestales y Agropecuarias Zapoteco Chinanteca [UZACHI], 2006).

Bosque pino-encino

La especie de referencia utilizada en este estudio para el género *Pinus* es *Pinus patula*, ya que está generalizada y naturalizada dentro de la región de estudio (Castellanos-Bolaños, 2008). Por otro lado, el género *Quercus* no fue representado por una especie específica, debido a su mayor diversidad y a que su madera casi no tiene un valor comercial.

La edad, la densidad, la altura y el grado de la mezcla entre especies es complejo, dependiendo de la heterogeneidad ambiental. El bosque de pino-encino en la producción comercial se maneja con el fin de favorecer la regeneración natural y el crecimiento del pino. Como especie secundaria, el encino depende del programa de cortas aplicado al pino, con un periodo de rotación de 40 años. Después de la corta se recogen todas las ramas de la masa forestal y se retira el encino, con el fin de favorecer la regeneración del pino. Obviamente, ninguna de estas intervenciones se aplica para los bosques no manejados.

Modelo CO2FIX

Estas masas forestales mixtas de la Sierra Juárez proporcionan una oportunidad de comparar las estimaciones del modelo CO2FIX con resultados basados en el muestreo directo realizado en México (Díaz-Franco et al., 2007; Ordoñez, 2000; Pérez-Suárez, Arredondo-Moreno, Huber-Sannwald, & Vargas-Hernández, 2009; Rocha-Loredo &

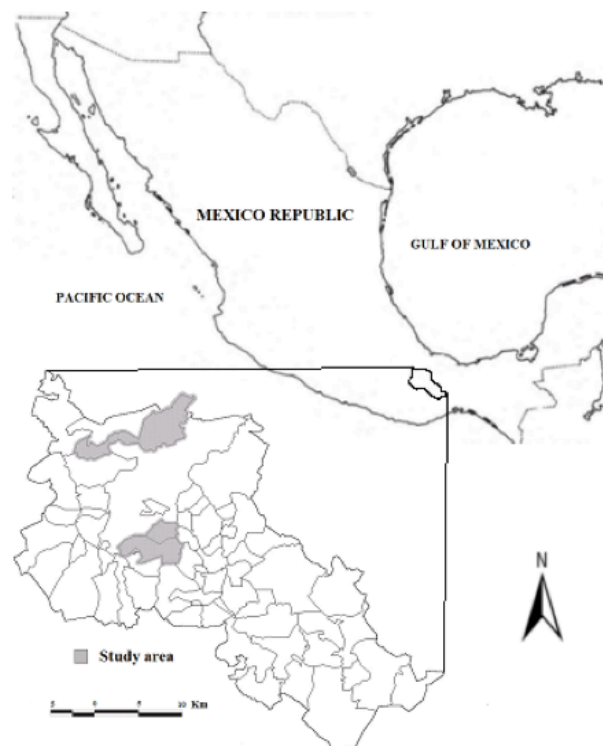


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio (Sierra Juárez).
FIGURE 1. Location of the study area (Juarez Mountain Range).

of this area, 60 % is protected forest (the non-managed forests), 39 % is dedicated to commercial production, and only 1 % is degraded areas in restoration. The mean annual temperature is 15.2 °C and total annual rainfall is 1,115.6 mm; the period of greatest intensity of rainfall extends from June to October. This climatic data come from the nearest meteorological station which is in Rancho Texas (17° 19' N-26° 27' W; 2,230 m), located less than 5 km from the study area, in the municipal district of Capulálpam de Méndez. The main soil type is Humic Acrisol (Unión de Comunidades Productoras Forestales y Agropecuarias Zapoteco Chinanteca [UZACHI], 2006).

Pine-Oak forest

The species reference used in this study for the *Pinus* genus is *Pinus patula*, as it is widespread and naturalized within the study region (Castellanos-Bolaños, 2008). In contrast, *Quercus* genus was not represented by a specific species due to its greater diversity and its timber has barely any commercial value.

The age, density, height and degree of mixing between species is complex depending on environmental heterogeneity. The pine-oak forest under commercial production is managed with a view to favouring natural regeneration and the growth of the pine. As a secondary species, the oak depends on the cutting schedule applied to the pine, with a rotation period of 40 years. After cutting, the whole of the stand is

CUADRO 1. Parámetros importantes utilizados para estimar las dinámicas de carbono en los bosques de pino-encino de la Sierra Juárez.

Parámetros	Pino	Encino	Fuente
Biomasa máxima en la masa forestal (Mg·ha ⁻¹)	400.00		Schelhaaset al., 2004
Contenido de carbono (MgC·Mg ⁻¹)	0.49	0.49	IPCC, 2006.
Densidad de madera (Mg·m ⁻³)	0.45	0.63	IPCC, 2006.
Contenido de carbono en tallo (MgC·Mg ⁻¹)	0.49	0.49	IPCC, 2006.
Contenido de carbono en follaje (MgC·Mg ⁻¹)	0.47	0.47	IPCC, 2006.
Contenido de carbono en rama (MgC·Mg ⁻¹)	0.47	0.47	IPCC, 2006.
Contenido de carbono en raíz (MgC·Mg ⁻¹)	0.47	0.47	IPCC, 2006.
Tasa de rotación de follaje (año ⁻¹)	0.33	1.00	De Jong et al., 2007
Tasa de rotación de rama (año ⁻¹)	0.02	0.02	De Jong et al., 2007
Tasa de rotación de raíz (año ⁻¹)	0.02	0.03	De Jong et al., 2007
Mortalidad natural (%)	0.01	0.005	Schelhaas et al., 2004

TABLE 1. Important parameters used to estimate carbon dynamics in pine-oak forests in the Juarez Mountain Range.

Parameters	Pine	Oak	Source
Maximum biomass in the stand (Mg·ha ⁻¹)	400.00		Schelhaas et al., 2004
Carbon content (MgC·Mg ⁻¹)	0.49	0.49	IPCC, 2006.
Wood density (Mg·m ⁻³)	0.45	0.63	IPCC, 2006.
Stem carbon content (MgC·Mg ⁻¹)	0.49	0.49	IPCC, 2006.
Foliage carbon content (MgC·Mg ⁻¹)	0.47	0.47	IPCC, 2006.
Branch carbon content (MgC·Mg ⁻¹)	0.47	0.47	IPCC, 2006.
Root carbon content (MgC·Mg ⁻¹)	0.47	0.47	IPCC, 2006.
Foliage turnover rate (year ⁻¹)	0.33	1.00	De Jong et al., 2007
Branch turnover rate (year ⁻¹)	0.02	0.02	De Jong et al., 2007
Root turnover rate (year ⁻¹)	0.02	0.03	De Jong et al., 2007
Natural mortality (%)	0.01	0.005	Schelhaas et al., 2004

Ramírez-Suárez, 2009). Nuestro trabajo involucra esencialmente los módulos de biomasa y suelo del modelo CO2FIX, sin tomar en cuenta las posibilidades de análisis ofrecido por otros módulos (productos, bioenergía, financiamiento y contabilidad del carbón), ya que los objetivos son estudiar la línea base que el modelo establece para las condiciones específicas de suelo, forestales y climáticas del bosque de pino-encino de la Sierra Juárez. El módulo de suelo se basa en el modelo Yasso desarrollado por Liski, Palosuo, Peltoniemi, & Sievänen (2005) y evalúa la descomposición de la materia orgánica y la dinámica de C en los suelos forestales bien drenados, en la que el agua no lleva a una disminución en la velocidad de descomposición. El modelo describe el valor total de C orgánico, sin distinguir entre los diferentes horizontes. Los datos utilizados para la aplicación del modelo CO2FIX en bosques de pino-encino de la Sierra Juárez (Cuadros 1 y 2) provienen de los estudios de muestreo

cleared of brush and all the oak is removed in order to favour the regeneration of the pine. Obviously, for non-managed forests none of these interventions are applied.

CO2FIX model

These mixed forest stands in the Sierra Juarez Mountain Range offer an opportunity to compare estimates of the CO2FIX model with results based on direct sampling carried out in México (Díaz-Franco et al., 2007; Ordoñez, 2000; Pérez-Suárez, Arredondo-Moreno, Huber-Sannwald, & Vargas-Hernández, 2009; Rocha-Loredo & Ramírez-Suárez, 2009). Our work essentially involves the biomass and soil modules of CO2FIX model, without taking into account the possibilities for analysis offered by other modules (products, bioenergy, financing and carbon accounting), as the objectives are to study the baseline that the model establis-

CUADRO 2. Incremento anual actual para el pino y el encino.

Edad (años)	Pino (m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Encino (m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Edad (años)	Pino (m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Encino (m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
0	0.000	0.000	50	14.148	9.865
10	10.665	-	55	12.661	-
15	20.389	-	60	11.368	5.493
20	23.786	3.964	65	10.246	-
25	23.582	5.864	70	9.269	3.312
30	21.925	6.940	80	7.677	-
35	19.848	8.374	90	-	2.776
40	17.761	8.825	200	3.998	2.776

Fuente: UZACHI (2006).

TABLE 2. Current annual increment for pine and oak.

Age (years)	Pine (m ³ ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Oak (m ³ ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Age (years)	Pine (m ³ ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Oak (m ³ ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)
0	0.000	0.000	50	14.148	9.865
10	10.665	-	55	12.661	-
15	20.389	-	60	11.368	5.493
20	23.786	3.964	65	10.246	-
25	23.582	5.864	70	9.269	3.312
30	21.925	6.940	80	7.677	-
35	19.848	8.374	90	-	2.776
40	17.761	8.825	200	3.998	2.776

Source: UZACHI (2006).

directo en la sierra estudiada (UZACHI, 2006). Cuando no existe información específica disponible, el archivo de datos "Central_Mexico_Pine_Oak", que se incluye en el paquete de instalación (Schelhaas et al., 2004), se utiliza de la misma manera que por De Jong et al. (2007).

Los resultados se calcularon sobre un horizonte de 200 años, lo que se considera un periodo suficiente para estudiar la evolución de la masa forestal después del balance inicial generado por la fuerte competencia entre los estratos en la colonización del terreno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 2 a 5 se muestran los resultados del estudio, mientras que en los Cuadros 3, 4 y 5 se muestra una comparación con otros estudios realizados en los bosques mexicanos similares de pino-encino basándose en el muestreo directo y en la aplicación de ecuaciones alométricas. No se ha considerado la comparación con otros estudios desarrollados fuera de México, con el fin de centrar la discusión en los objetivos de nuestro estudio.

hes for the specific climatic, soil and forestry conditions of the pine-oak forest in the Juarez Mountain Range. The soil module is based on the Yasso model developed by Liski, Palosuo, Peltoniemi, and Sievänen, (2005) and assesses the decomposition of the organic matter and the C dynamic in well-drained forestry soils, in which water does not lead to a decrease in the rate of decomposition. The model describes the total stocks of organic C, without distinguishing between the different horizons. The data used for the application of the CO2FIX model in pine-oak forests in the Juarez Mountain Range (Tables 1 and 2) come from direct sampling works at the studied range (UZACHI, 2006). When no specific information is available, the data file "Central_Mexico_Pine_Oak", which is included in the installation package (Schelhaas et al., 2004), is used in a similar way as by De Jong et al. (2007).

The results were calculated on a time horizon of 200 years, which is considered a long enough period to study the evolution of the stand after the initial imbalance generated by the strong competition between the strata in the colonisation of the terrain.

En la Figura 2 se muestra la línea base para el bosque de pino-encino, el cual alcanza su valor máximo ($236.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) a la edad de 53 años, como resultado de la adición de C presente en el C en la biomasa viva del árbol ($208.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y C orgánico en el suelo ($27.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Esto significa que el actual periodo de rotación de 40 años puede ser corto en criterios de servicio ambiental. El poco C orgánico en el suelo puede deberse a que solo se consideraron las entradas del periodo de 53 años de bosque de pino-encino. En comparación con un bosque similar pero en la zona de Michoacán (Ordóñez, 2000), por una parte el C en la biomasa, ligeramente más bajo (Cuadro 3) se puede atribuir al hecho de que no se consideraron en ese estudio los árboles con un diámetro menor a 30 cm. Por otro lado, con respecto al C orgánico en el suelo, la metodología distinta aplicada por Ordóñez (2000) alcanza cantidades totales ligeramente superiores de C en el suelo. Esto se debe a que Ordóñez (2000) extendió sus cálculos para el total de C presente en los primeros 20 cm del suelo, incluyendo los horizontes orgánicos y minerales, mientras que el modelo CO2FIX estima los insumos de las hojas, ramas, tallos y raíces de los árboles, y no incluye ninguna contribución de C realizada por otros elementos de la planta o incluso de la biomasa microbiana del suelo. Así, el modelo CO2FIX proporciona porcentajes de C en el suelo más bajos (12-17 %) en relación al C total del sistema. En primer lugar, cabe mencionar que no se alcanzó ningún estado estacionario en la evolución del C en el suelo en el horizonte de tiempo considerado. En segundo lugar, las temperaturas altas y la precipitación conducen a la descomposición activa y los procesos de mineralización de la materia orgánica en

RESULTS AND DISCUSSION

Figures 2 to 5 show the results of this study while Tables 3, 4 and 5 show a comparison with other studies carried out in similar Mexican pine-oak forests and based on direct sampling and the application of allometric equations. In order to focus the discussion on the objectives of our study, no comparison with other studies developed out of Mexico have been considered.

Figure 2 shows the C baseline for the pine-oak forest. It reaches its maximum value ($236.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) at the age of 53 years as the result of adding the C present in the living tree C biomass ($208.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) and soil organic C ($27.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). It means that the current 40-year rotation period may be short under environmental service criteria. The low soil organic C may be because we have only considered the inputs from the 53-year period of the pine-oak forest. In comparison to a similar forest but in the Michoacan area (Ordóñez, 2000), on the one hand its slightly lower C biomass (Table 3) can be attributed to the fact that trees with a diameter of less than 30 cm were not considered in that study. On the other hand regarding soil organic C, the different methodology applied by Ordóñez (2000) reaches slightly higher total soil C amounts. This is because Ordóñez (2000) extended his calculations to the total C present in the first 20 cm of soil, including the organic and mineral horizons, whereas the CO2FIX model estimates the inputs from the foliage, branches, stems and roots of the trees, and does not include any C contribution made by other plant elements or even soil

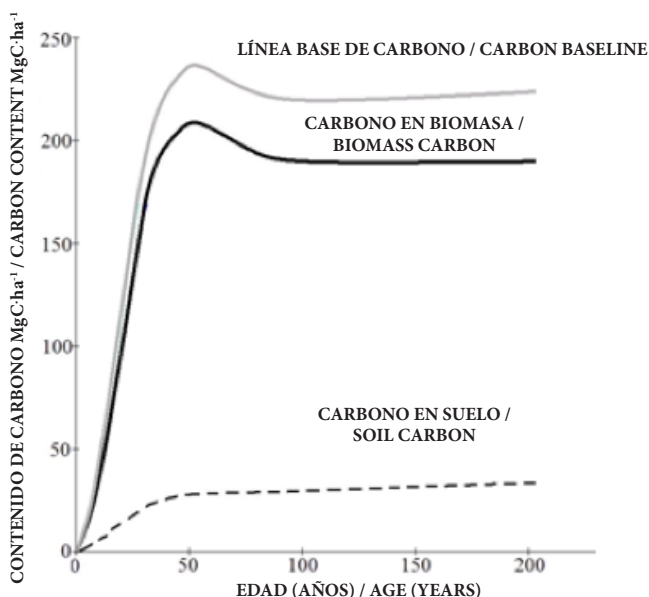


FIGURA 2. Carbono en la línea base de carbono y sus componentes de suelo y biomasa en el bosque de pino-encino de la Sierra Juárez.

FIGURE 2. Carbon in carbon baseline and its soil and biomass components in the pine-oak forest of the Juez Mountain Range.

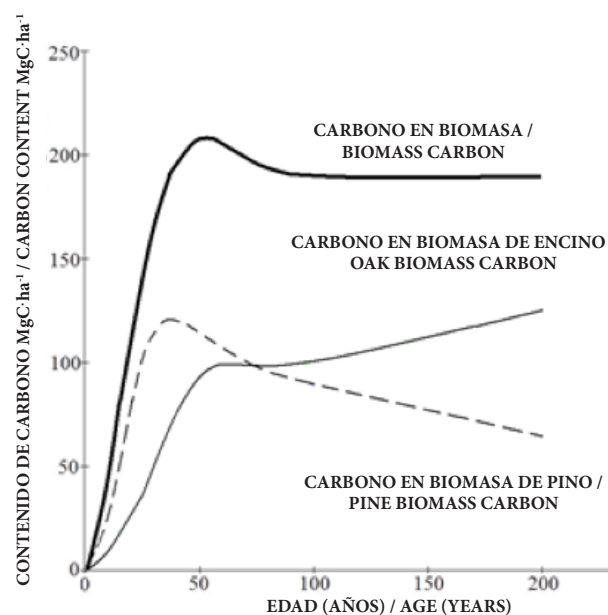


FIGURA 3. Carbono en biomasa y sus componentes de pino y encino en el bosque de pino-encino de la Sierra Juárez.

FIGURE 3. Carbon in biomass and its oak and pine components in the pine-oak forest of the Juez Mountain Range.

el suelo. Por ello, se esperaría que este valor de C en el suelo aumentara en horizontes de temporales más largos y alcanzara los valores de C en el suelo que suelen encontrarse en estas regiones intertropicales, aproximadamente 50 % del C total del sistema (Panel intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC], 2001).

Para identificar los elementos que conforman la línea base de C, el modelo CO2FIX permite analizar la dinámica de las fracciones de la biomasa para las especies de pino y encino. El carbono en biomasa de pino alcanza su máximo (Figura 3) a los 38 años ($118.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). El crecimiento inicial del encino es menos pronunciado que el del pino, pero constante hasta los 60 años (Figura 3); en ese momento su carbono en biomasa se estabiliza alrededor de $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Después de los 100 años, el encino comienza nuevamente un crecimiento modesto, hasta alcanzar $126 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ al final de tiempo de horizonte estudiado.

En las Figuras 4 y 5 se observa la evolución particular de las fracciones individualizadas de los tallos, ramas, raíces y hojas para cada especie, pino y encino respectivamente. Puede ser relevante para una evaluación del manejo forestal que incluye el servicio ambiental del secuestro de C; es decir, la contribución de C proveniente del follaje de encino es 1.8 veces mayor que la contribución del pino (Cuadro 4). Este follaje genera una mayor contribución de nutrientes en el suelo, como señaló Pérez-Suárez et al. (2009). Sin embargo, las distintas definiciones de los diversos elementos considerados dentro de cada fracción hacen que siempre se dificulte obtener un ajuste bueno entre las distintas fracciones. Así, el modelo CO2FIX parece subestimar los valores totales del follaje comparado con el muestreo directo realizado

microbial biomass. Thus, the CO2FIX model provides general lower percentages (12-17 %) of soil C in relation with the total C of the system. Firstly, it is worth noting that no steady state is reached in the evolution of soil C in the time horizon considered. Secondly, high temperatures and rainfall lead to active decomposition and mineralization processes of the organic matter in the soil. Therefore, it would be expected that this soil C value will increase in longer time horizons and reach the soil C values usually found in these intertropical regions, around 50 % of the total C of the system (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2001).

To identify the elements which comprise the C baseline, the CO2FIX model allows analysing the dynamic of the biomass fractions for both oak and pine species. The pine C biomass has its maximum (Figure 3) at 38 years ($118.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). The initial growth of the oak is less pronounced than that of the pine, but constant until 60 years (Figure 3); at that time its C biomass stabilises at around $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. After 100 years a modest growth in the oak begins again, until it reaches $126 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ towards the end of the time horizon studied.

Figures 4 and 5 show the particular evolution of the individualised fractions of the stems, branches, roots and foliage for each species, oak and pine respectively. It may be relevant for an assessment of forestry management including the environmental service of C sequestration; i. e., the contribution of C from the oak foliage is 1.8 times greater than the contribution of the pine (Table 4). This foliage makes a greater nutrient contribution to the soil, as pointed out by Pérez-Suárez et al. (2009). However, the different definitions of the various elements considered within each fraction

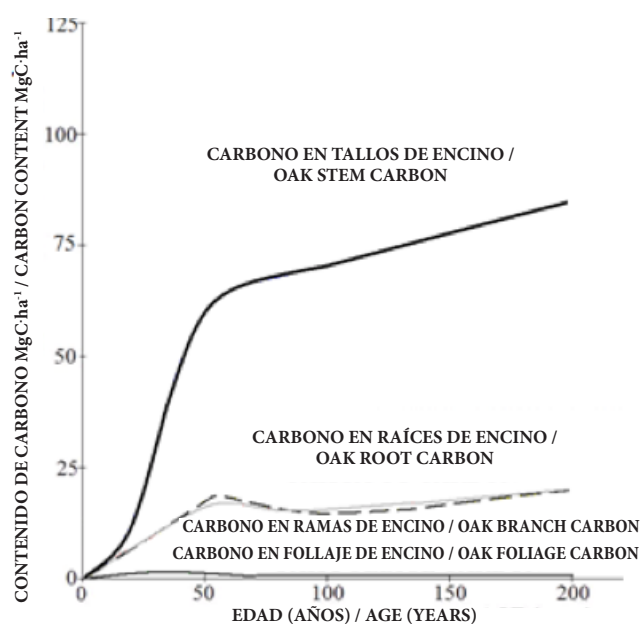


FIGURA 4. Carbono en fracciones de biomasa en tallos, ramas, raíces y follaje en cohorte de encino de la Sierra Juárez.
FIGURE 4. Carbon in stems, branches, roots and foliage biomass fractions in oak cohort in the Juarez Mountain Range.

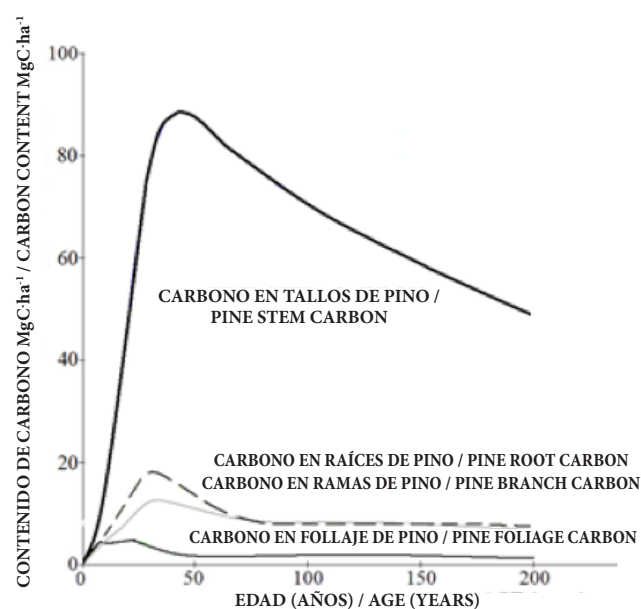


FIGURA 5. Carbono en fracciones de biomasa en tallos, ramas, raíces y follaje en cohorte de pino de la Sierra Juárez.
FIGURE 5. Carbon in stems, branches, roots and foliage biomass fractions in pine cohort in the Juarez Mountain Range.

CUADRO 3. Estimaciones de la línea base de carbono de la biomasa y el suelo en el bosque de pino-encino.

Método	Edad (años)	Biomasa (Mg·ha ⁻¹)	Suelo (Mg·ha ⁻¹)	Total (Mg·ha ⁻¹)	Fuente
Ecuaciones alométricas	40±10*	122-152	63	184-215	Ordoñez(2000)
ModeloCO2FIX v 3.2	40	195	25	220	Presente estudio
Modelo CO2FIX v 3.1	400	195	79	273	Schelhaas et al. (2004)
Modelo CO2FIX v 3.2	400	191	39	230	Presente estudio

* Edad estimada a partir del manejo forestal general en el área.

TABLE 3. Carbon baseline estimates of biomass and soil in pine-oak forest.

Method	Age (years)	Biomass (Mg·ha ⁻¹)	Soil (Mg·ha ⁻¹)	Total(Mg·ha ⁻¹)	Source
Allometric equations	40±10*	122-152	63	184-215	Ordoñez (2000)
Model CO2FIX v 3.2	40	195	25	220	This study
Model CO2FIX v 3.1	400	195	79	273	Schelhaas et al. (2004)
Model CO2FIX v 3.2	400	191	39	230	This study

*Estimated age from the general forest management in the area.

CUADRO 4. Distribución de las entradas anuales de carbono al suelo dependiendo de los componentes de biomasa a lo largo del tiempo.

Edad (año)	Total(Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Fuente
50	4.61	Presente estudio
100	3.81	Presente estudio
40±10*	3.71	Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial (2009)
81±8	2.94	Pérez-Suárez et al. (2009)

* Edad estimada a partir del manejo forestal general en el área.

TABLE 4. Distribution of annual carbon inputs to soil depending on the components of biomass over time.

Age (year)	Total (Mg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Source
50	4.61	This study
100	3.81	This study
40 ± 10*	3.71	Rocha-Loredo and Ramírez-Marcial (2009)
81 ± 8	2.94	Pérez-Suárez et al. (2009)

*Estimated age from the general forest management in the area.

CUADRO 5. Contribución relativa de fracciones de biomasa de *Pinus patula*.

Edad	Tallos	Follaje	Ramas	Raíces	Fuente
40±10*	78.82	8.6	7.51	5.07	Díaz-Franco et al. (2007)
50	76.99	1.50	9.69	9.69	Presente estudio
100	79.57	2.21	9.28	9.28	Presente estudio
150	76.86	2.26	10.28	10.28	Presente estudio

* Edad estimada a partir del manejo forestal general en el área.

TABLE 5. Relative contribution of biomass fractions of *Pinus patula*.

Age	Stems	Foliage	Branches	Roots	Source
40 ± 10*	78.82	8.6	7.51	5.07	Díaz-Franco et al. (2007)
50	76.99	1.50	9.69	9.69	This study
100	79.57	2.21	9.28	9.28	This study
150	76.86	2.26	10.28	10.28	This study

*Estimated age from the general forest management in the area.

por Díaz-Franco et al. (2007), Pérez-Suárez et al. (2009), y Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial (2009). Estos últimos autores pueden haber tenido dificultades al separar los braquiblastos y, por lo tanto, los incluyeron dentro de la fracción del follaje, en lugar de contarlos dentro de la fracción de las ramas. De igual manera, el porcentaje más bajo de raíces detectado por los mismos autores podría estar relacionado con el hecho de que sólo se contó el C en el tocón, utilizando la fórmula propuesta por Avery y Burkhart (1983). Sin embargo, las diferencias individuales detectadas en los valores del follaje, ramas y raíces generalmente equilibran todo, y son comparables con los resultados obtenidos con el modelo CO2FIX.

El modelo CO2FIX puede identificar las figuras de las entradas anuales de C al suelo. Los flujos totales de C en biomasa en el suelo oscilan entre 4.61 a 3.72 Mg·ha⁻¹·year⁻¹ (Cuadro 4). El follaje es el componente de esta biomasa que tiene la mayor importancia (33-37 %), seguido por los tallos y las raíces (20-25 %) y finalmente las ramas (16-19 %). Estos resultados son comparables con los resultados obtenidos con los muestreos directos de Pérez-Suárez et al. (2009) y Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial (2009). Estos autores proporcionan datos provenientes de la contribución anual promedio de hojarasca (follaje, ramas, flores y frutos), debidamente transformados en contenido de C (mediante el factor 0.49 Mg·Mg⁻¹). La mayor diferencia puede ser ocasionada por la dificultad de medición en los muestreos directos de todos los flujos de C.

En términos generales, los resultados de los estudios basados en los exhaustivos muestreos destructivos como aquellos realizados por Díaz-Franco et al. (2007) con 25 árboles de *P. patula* (Cuadro 5) y Ordoñez (2000) (Cuadro 3), proporcionan carbono en todas las fracciones, con excepción de C en el follaje y C en el suelo, menor que en los resultados del modelo CO2FIX. Los resultados de los estudios efectuados por Etchevers-Barra et al. (2002) y Roncal-García et al. (2008) se mostraron en unidades de árbol. Por lo tanto, sin conocer la densidad de la masa no se puede hacer la comparación. El modelo CO2FIX genera salidas por unidad de área, generalmente más útil para la planificación forestal. Hoy en día, el principal valor del bosque de pino-encino reside en su uso como fuente de madera, pero el secuestro de C podría representar un valor adicional importante. Sin embargo, los criterios de manejo actuales sólo favorecen la optimización de la producción de madera. Desde el punto de vista del secuestro de C, los periodos de rotación más cortos para pino considerados actualmente, pueden no ser los más eficientes, aunque esto podría estar en una contradicción con los intereses económicos dominantes.

CONCLUSIONES

Este modelo abre el camino para un nuevo tipo de manejo forestal, que está al alcance de las comunidades de países emergentes o en desarrollo, cuya situación socioeconómica no les permite llevar a cabo otros tipos de estudios como

always render it difficult to obtain a good fit between the various fractions. Thus, the CO2FIX appears to underestimate the total values of foliage compared to the direct sampling by Díaz-Franco et al. (2007), Pérez-Suárez et al. (2009), and Rocha-Loredo and Ramírez-Marcial (2009). These last authors may have had difficulties separating the brachiblasts and, therefore, they have counted the brachiblasts within the foliage fraction instead of within the branch fraction. Similarly, the lower percentage of roots detected by the same authors could be related to the fact that they have only counted the C in the stump, applying the formula proposed by Avery and Burkhart (1983). However, the individual differences detected in the values of foliage, branches and roots generally balance out overall, and are comparable with the results obtained with the CO2FIX model.

The CO2FIX model can identify the figures of the annual C inputs to soil. The total C flows from biomass into soil range from 4.61 to 3.72 Mg·ha⁻¹·year⁻¹ (Table 4). Foliage is the component of this biomass that has the greatest importance (33-37 %), followed by the stems and the roots (20-25 %) and finally the branches (16-19 %). These results are comparable with the results obtained with direct samplings (Pérez-Suárez et al., 2009; Rocha-Loredo & Ramírez-Marcial, 2009). These authors provide data from the average annual contribution of litter (foliage, twigs, flowers and fruits) duly transformed into C content (by means of the factor 0.49 Mg·Mg⁻¹). The slight higher difference may be caused by the difficulty of measuring in direct samplings all C flows.

In general terms, the results from studies based on exhaustive destructive samplings such as the ones made by Díaz-Franco et al. (2007) with 25 trees of *P. patula* (Table 5) and Ordoñez (2000) (Table 3) offer lower C in all fractions except for foliage C and soil C than the results from the CO2FIX model. The results from the studies made by Etchevers-Barra et al. (2002) and Roncal-García et al. (2008) were given in tree units. Thus, without knowing the tree density it is not possible to make the comparison. CO2FIX generates output per unit area, usually more useful for forest planning. Today the main value of the pine-oak forest resides in its use as a source of timber, but C sequestration could represent an important added value. However, current management criteria only favour the optimisation of timber production. Thus, from the viewpoint of C sequestration, the shorter rotation lengths for pine currently considered may not be the most efficient, although this could be in clear conflict with the prevailing economic interests.

CONCLUSIONS

This model paves the way for a new type of forestry management which is within reach of communities in emergent or developing countries whose socio-economic situation may not allow them to carry out other types of studies such as those compared here. The CO2FIX v3.2 model is able to determine, simply and efficiently, the C reservoirs and flows in the system, thereby making it possible to estimate the C ba-

los aquí comparados. El modelo CO2FIX v3.2 es capaz de determinar, de manera sencilla y eficiente, los reservorios y flujos de C en el sistema, haciendo posible la estimación de la línea base de C y su utilización como una herramienta para integrar el servicio ambiental del secuestro de C en la planeación forestal adicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de la Sierra Juárez y a la comunidad de Capulalpam de Méndez por su hospitalidad y uso de sus instalaciones. Este trabajo fue parcialmente financiado por el Ministerio de Educación de España con el número de referencia SUM2006-00034-CO2 y el número de proyecto AGL2010-16862/FOR y los gastos del viaje por la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- Avery, T. E. & Burkhart, H. E. (1983). *Forest measurement*. Texas, USA: McGraw-Hill.
- Brown, S., & Lugo, A. E. (1984). Biomass of tropical forests-A new estimate based on forest volumes. *Science*, 223(4642), 1290–1293, doi:10.2307/1692790
- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M., Kauppi, P., Burschel, P., Grainger, A.,...Meyers, S. (1996). Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In R. T. Watson, M. C. Zinyowera, & R. H. Moss (Eds.), *Climate change 1995. Impacts, adaptations, and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses* (pp. 775–794). USA: IPCC/ Cambridge University Press.
- Butchart, S. H. M., Walpole, M., Collen, B., Van Strien, A., Scharlemann, J. P. W., Almond, R. E. A.,... Watson, R. (2010). Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 328(5982), 1164–1168. doi: 10.1126/science.1187512
- Cairns, M., Barker, J., Shea, R., & Haggerty, P. (1995). Carbon dynamics of Mexican tropical evergreen forests-influence of forestry mitigation options and refinement of carbon flux estimates. *Interciencia*, 20(6), 401–408. Obtenido de http://www.interciencia.org/v20_06/art14/
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. D., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez Pérez, J., Musalem-Santiago, M., & López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51–63. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61711316005>
- De Jong, B. H. J., Montoya-Gomez, G., Nelson, K., Soto-Pinto, L., Taylor, J., & Tipper, R. (1995). Community forest management and carbon sequestration-a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia*, 20(6), 409–416. Obtenido de http://www.interciencia.org/v20_06/art15/
- De Jong, B. J., Maser, O., Olguin, M., & Martínez, R. (2007). Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 242(2-3), 398–411. doi: 10.1016/j.foreco.2007.01.057

seline and be used as a tool for integrating the environmental service of C sequestration into further forestry planning.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank the University of Sierra Juárez and the community of Capulalpam de Méndez for their hospitality and use of their facilities. This work has been partially funded by the projects AGL2010-16862/FOR and the reference SUM2006-00034-CO2 from the Spanish ministry of education (MEC) and the travel grant from the Polytechnic University of Madrid.

End of English Version

- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61713103.pdf>
- Etchevers-Barra, J. D., Vargas-Hernández, J., Acosta-Mireles, M., & Velázquez-Martínez, A., (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725–736. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=30236610>
- Friend, A. D., Stevens, A. K., & Knox, R. G. (1997). A process based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecological Modelling*, 95(2-3), 249–287. doi: 10.1016/S0304-3800(96)00034-8
- Garibay-Orijel, R., Martínez-Ramos, M., & Cifuentes, J. (2009). Disponibilidad de esporomas de hongos comestibles en los bosques de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Mexico Biodiversidad*, 80(2), 521–534. Obtenido de <http://www.ejournal.unam.mx/bio/BIO80-02/BIO80000222.pdf>
- Gracia, C., Tello, E., Sabaté, S., & Bellot, J. (1999). GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. In F. Rodà, J. Retana, C. Gracia, & J. Bellot (Eds.), *Ecology of mediterranean evergreen oak forests* (Vol. 137, pp. 163–179). Germany: Springer Berlin Heidelberg.
- Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzer, C.,...Fischer-Kowalski, M. (2007). Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Science*, 104, 12942–12947. doi: 10.1073/pnas.0704243104
- Haxeltine, A., & Prentice, I. C. (1996). BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4), 693–709. doi: 10.1029/96GB02344
- Hoekstra, A.Y. (2009). Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68, 1963–1974. doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.06.021

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Third assessment report. Climate change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use*. Japan: IGES.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F.,...Kenneth, A. B. (2006) How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137(3-4), 253–268. doi: 10.1016/j.geoderma.2006.09.003
- Kellomaki, S., & Vaisanen, H. (1997). Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. *Ecological Modelling*, 97(1-2), 121–140. doi: 10.1016/S0304-3800(96)00081-6
- Kurz, W. A., Apps, M. J., Webb, T. M., & McNamee, P. J. (1993). Carbon budget of the Canadian forest sector. Phase I. *Simulation*, 61(2), 139–144. doi: 10.1177/003754979306100206
- Landsberg, J. J. & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3), 209–228. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00026-1
- Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., & Sievänen, R. (2005). Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*, 189(1-2), 168–182. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005
- Lorence, D., & García-Mendoza, A. (1989). *The state of floristic inventory of Oaxaca state, Mexico. Strategy for inventory of tropical forest*. Mexico. World Wildlife Fund.
- Masera, O., Bellon, M. R., & Segura, G. (1997). Forestry options for sequestering carbon in Mexico: Comparative economic analysis of three case studies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 27(1), 227–244. doi: 10.1080/10643389709388522
- Masera, O., Garza-Caligaris, J. F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G. J., ...De Jong, B. J. (2003). Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164(2-3), 177–199. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00419-2
- Mohren, G. M. J., & Goldewijk, C. G. M. K (1990). *CO2FIX: A dynamic model of the CO2-fixation in forest stands. Model documentation and listing*. Wageningen, The Netherlands: Research Institute for Forestry and Urban Ecology.
- Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., Da Fonseca, G., & Kent, J. (2000). Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. doi: 10.1038/35002501
- Ordoñez, A. (2000). *Estimación preliminar del contenido de carbono para el Ejido de San Pedro Jacuaro, Michoacán*. México: Instituto de Ecología, UNAM,
- Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J. T., Huber-Sannwald, E., & Vargas-Hernández, J. J. (2009). Production and quality of senesced and green litter fall in a pine-oak forest in central-northwest Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 1307–1315. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.031
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 42–55. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x
- Rocha-Loredo, A. G., & Ramírez-Marcial, N. (2009). Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 84, 1–12. Obtenido de <http://scielo.unam.mx/pdf/bsbm/n84/n84a1.pdf>
- Roncal-García, S., Soto-Pinto, L., Castellanos-Albores, J., Ramírez-Marcial, N., & De Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(3), 200–206. Obtenido de <http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v33n3/art09.pdf>
- Rubio, A., Gavilán, R. G., Montes, F., Gutiérrez-Girón, Díaz-Pines, E., & Mezquida, E. T. (2010). Biodiversity measures applied to stand-level management: Can they really be useful? *Ecological Indicators*, 11(2), 545–556. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.07.011
- Schelhaas, M. J., Van Esch, P. W., Groen, T. A., De Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Masera, O.,...Vilén, T. (2004). CO2FIX V 3.1-description of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. Obtenido de <http://www.efi.int/projects/casfor/models.htm>
- Seiler, W., & Crutzen, P. J. (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change*, 2(3), 207–247. doi: 10.1007/BF00137988
- Sheinbaum, C., & Masera, O. (2000). Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities: The case of Mexico. *Climatic Change*, 47(3), 259–282. doi: 10.1023/a:1005610923555
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., Gryze, S. D., Morris, S. J., Gregorich, E. G.,...& Paustian, K. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society America Journal*, 66, 1981–1987. doi: 10.1039/c1cc11829c
- Unión de Comunidades Productoras Forestales y Agropecuarias Zapoteco Chinanteca [UZACHI]. (2006). *Programa de manejo forestal persistente para el aprovechamiento maderable de la comunidad de Santiago Xiacui, Oaxaca*. México: Autor.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2007). *GEO4 Global Environment Outlook: Environment for development*. Malta: Progress Press
- Wackernagel, M., Schulz, N. B., Deumling, D., Linares, A. C., Jenkins, M., Kapos, V., ...Randers, J. (2002). Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Science*, 99, 9266–9271. doi: 10.1073/pnas.142033699
- WWF International, Global Footprint Network, ZSL (Zoological Society of London), (2012). *Living Planet Report 2012. Biodiversity, biocapacity and better choices* Gland, Switzerland: Autor. Obtenido de http://www.awsassets.panda.org/downloads/1_lpr_2012_online_full_size_single_pages_final_120516.pdf