

# ACUMULACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO EN REFORESTACIONES DE *Pinus michoacana*

## ACCUMULATION OF SOIL ORGANIC CARBON IN *Pinus michoacana* REFORESTATIONS

Salomón Luis-Mejía<sup>1</sup>, Armando Gómez-Guerrero<sup>1</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>2</sup>,  
Gregorio Ángeles-Pérez<sup>1</sup>, Miguel A. López-López<sup>1</sup> y William R. Horwath<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Forestal, <sup>2</sup>Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Carretera México-Texcoco km. 36.5. Montecillo, Estado de México. (lsmejia@colpos.mx) (agomezg@colpos.mx) (jetchev@colpos.mx) (gangeles@colpos.mx) (lopezma@colpos.mx). <sup>3</sup>Universidad de California. Campus Davis, EE.UU. (wrhorwath@ucdavis.edu)

### RESUMEN

La transferencia de carbono estabilizado de la vegetación al suelo es un proceso importante para abatir las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> atmosférico. El objetivo de este trabajo fue calcular la masa de nuevo carbono orgánico del suelo (NCOS) incorporada como resultado del establecimiento de reforestaciones con *Pinus michoacana*. Se estudiaron parcelas con cultivo de maíz, en las cuales una porción del área se reforestó con pino. La cantidad de NCOS se calculó a partir de las diferencias en composición de isótopos ( $\delta^{13}C$ ) del suelo y tejido vegetal, en una cronosecuencia, con el modelo simple de mezclas. Los resultados indicaron diferencias estadísticas ( $p \leq 0.001$ ) en  $\delta^{13}C$  entre el grupo de parcelas de maíz y las reforestaciones. La proporción de NCOS fue 62 y 18%, en las profundidades de 0-5 y 5-10 cm en reforestaciones de 20 años. El ajuste de los datos por densidad aparente y el uso de un modelo cuadrático indicó que la masa promedio de incorporación de NCOS es 11.2 y 2.30 Mg ha<sup>-1</sup> a los 20 años, y tasas de acumulación de 0.561 y 0.11 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en las mismas profundidades. No se encontró NCOS desde pinos en profundidades mayores a 10 cm, lo que sugiere una dinámica de carbono más alta en el suelo superficial.

**Palabras clave:**  $\delta^{13}C$ , cronosecuencias en andosoles, isótopos estables, materia orgánica del suelo.

### INTRODUCCIÓN

La acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) es un proceso importante para mitigar efectos del cambio climático, ya que el suelo, además de ser un sumidero, es un reservorio de carbono estabilizado (Arnalds, 2004; Etchevers *et al.*, 2006). Los aspectos del ciclo del carbono estudiados en México están asociados principalmente a la biomasa aérea (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Seppänen, 2002; García-Oliva y Maser, 2004), pero poco se conoce sobre la dinámica de acumulación de

Recibido: Noviembre, 2006. Aprobado: Agosto, 2007.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 711-721. 2007.

### ABSTRACT

The transfer of stable carbon from vegetation to the soil is an important process for reducing elevated concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub>. The objective of the present study was to calculate the mass of new soil organic carbonic (NSOC) incorporated as a result of the establishment of reforestation with *Pinus michoacana*. Plots sown with corn were studied, in which a portion of the area was reforested with pine. The amount of NSOC was calculated from the differences in composition of isotopes ( $\delta^{13}C$ ) from the soil and plant tissue, in a chronosequence, with the simple mixture model. Results indicated statistical differences ( $p \leq 0.001$ ) in  $\delta^{13}C$  between the group of corn plots and the reforestations. The amount of NSOC was 62 and 18%, in the depths of 0-5 and 5-10 cm in reforestations of 20 years. The fit of the data by apparent density and the use of a quadratic model indicated that the average mass of NSOC incorporation is 11.2 and 2.30 Mg ha<sup>-1</sup> at 20 years, and the accumulation rates are 0.561 and 0.11 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> at the same depths. No NSOC from pine was found at depths of over 10 cm, which suggests a higher carbon dynamic in the superficial soil.

**Key words:**  $\delta^{13}C$ , chronosequences in andisols, stable isotopes, soil organic matter.

### INTRODUCTION

The accumulation of soil organic carbon (SOC) is an important process for mitigating the effects of climatic change, given that the soil, in addition to being a sink, is a reservoir of stable carbon (Arnalds, 2004; Etchevers *et al.*, 2006). The aspects of the carbon cycle that have been studied in México are mainly associated with aboveground biomass (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Seppänen, 2002; García-Oliva and Maser, 2004), but little is known of the dynamics of SOC accumulation (García-Oliva and Maser, 2004). Therefore the present study was aimed toward to calculate the recently incorporated SOC fraction as the result of the establishment of

COS (García-Oliva y Masera, 2004). Por tanto, el presente trabajo se orientó a calcular la fracción de COS de reciente incorporación como resultado del establecimiento de reforestaciones de pino. Este conocimiento puede contribuir al mejor entendimiento de la dinámica de carbono por cambios de uso de suelo de agrícola a forestal y de los impactos de una reforestación como un servicio ambiental.

El objetivo del presente estudio fue calcular la fracción de nuevo carbono del suelo y su tasa de incorporación en reforestaciones con *Pinus michoacana* utilizando la fracción de isótopos de carbono  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  del suelo. La metodología se basa en las diferencias de composición de isótopos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de plantas tipo C3 y C4 (Yoneyama *et al.*, 2001; Resh *et al.*, 2002; Bekele y Hudnall, 2003). El valor  $\delta^{13}\text{C}$  se refiere a la concentración de un isótopo en un material (Peterson y Fry, 1987; Ehleringer y Rundel 1989) y se define como:  $\delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{muestra}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 1000$ , donde  $\delta^{13}\text{C}$  es la composición isotópica de carbono en partes por mil (‰),  $R_{\text{muestra}}$  y  $R_{\text{standard}}$  son la proporción isotópica ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) en la muestra y el estándar (Balesdent *et al.*, 1987; Balesdent *et al.*, 1988; Boutton, 1991a). Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  indican la diferencia en contenido de  $^{13}\text{C}$  de una muestra, respecto al estándar que es un fósil de carbonato de calcio (*Belemnitella americana*) de la formación cretácica Pee Dee en Carolina del Sur (Boutton, 1991a); la fracción  $R_{\text{standard}}$  es 0.0112372 (Craig, 1957). Un valor absoluto de  $\delta^{13}\text{C}$  mayor indica más enriquecimiento de  $^{13}\text{C}$ .

El ingreso de carbono de una planta C3 donde había un cultivo C4, se calcula con la fracción de isótopos ( $A$ ) expresada de la forma  $A = [^{13}\text{C} / (^{12}\text{C} + ^{13}\text{C})]$ . Estas dos fuentes de carbono en ( $A$ ) con diferente fracción de isótopos son  $A = (X/100 \times A_1) + [(1 - X/100) \times A_0]$ , donde  $A$  es la fracción de carbono en un tiempo  $t$ ;  $X/100$  representa la fracción de carbono que proviene de la vegetación C3;  $A_0$  es la fracción de átomos de carbono en el tiempo cero (carbono en el suelo del cultivo C4);  $A_1$  es la fracción de átomos de carbono de la planta C3 (Balesdent *et al.*, 1987). Por tanto:

$$X/100 = (A - A_0) / (A_1 - A_0) \quad (1)$$

Debido a que  $A$  y  $\delta^{13}\text{C}$  tienen una relación lineal (Balesdent *et al.*, 1987), la Ecuación 1 puede expresarse en términos de:

$$\delta^{13}\text{C} (X/100) \approx (\delta - \delta_0) / (\delta_1 - \delta_0) \quad (2)$$

Para realizar el trabajo se empleó una secuencia cronológica de parcelas agrícolas cultivadas con maíz

pine reforestations. This knowledge can contribute to a better understanding of the carbon dynamics due to changes in land use from agriculture to forest and of the impacts of a reforestation as an environmental service.

The objective of the present study was to calculate the fraction of new soil carbon and its incorporation rate in reforestations with *Pinus michoacana* using the fraction of carbon isotopes  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  of the soil. The methodology is based on the differences in composition of carbon isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of type C3 and C4 plants (Yoneyama *et al.*, 2001; Resh *et al.*, 2002; Bekele and Hudnall, 2003). The value  $\delta^{13}\text{C}$  refers to the concentration of an isotope in a material (Peterson and Fry, 1987; Ehleringer and Rundel, 1989) and is defined as:  $\delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 1000$ , where  $\delta^{13}\text{C}$  is the isotopic composition of carbon in parts per thousand (‰),  $R_{\text{sample}}$  and  $R_{\text{standard}}$  are isotopic ratio ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) in the sample and the standard (Balesdent *et al.*, 1987; Balesdent *et al.*, 1988; Boutton, 1991a). The values of  $\delta^{13}\text{C}$  indicate the difference in  $^{13}\text{C}$  content of a sample, with respect to the standard which is a calcium carbonate fossil (*Belemnitella americana*) of the Cretaceous Pee Dee formation in South Carolina (Boutton, 1991a); the fraction  $R_{\text{standard}}$  is 0.0112372 (Craig, 1957). A higher absolute value of  $\delta^{13}\text{C}$  indicates more enrichment of  $^{13}\text{C}$ .

The input of carbon from a C3 plant where there had been a C4 crop, is calculated with the fraction of isotopes ( $A$ ) expressed in the form  $A = [^{13}\text{C} / (^{12}\text{C} + ^{13}\text{C})]$ . These two sources of carbon in ( $A$ ) with different fraction of isotopes are  $A = (X/100 \times A_1) + [(1 - X/100) \times A_0]$ , where  $A$  is the carbon fraction in a time  $t$ ;  $X/100$  represents the carbon fraction from C3 vegetation;  $A_0$  is the fraction of carbon atoms in the zero time (carbon in the soil of crop C4);  $A_1$  is the fraction of carbon atoms of the C3 plant (Balesdent *et al.*, 1987). Therefore:

$$X/100 = (A - A_0) / (A_1 - A_0) \quad (1)$$

Because  $A$  and  $\delta^{13}\text{C}$  have a linear relationship (Balesdent *et al.*, 1987), Equation 1 can be expressed in terms of:

$$\delta^{13}\text{C} (X/100) \approx (\delta - \delta_0) / (\delta_1 - \delta_0) \quad (2)$$

To carry out the work, a chronological sequence was used of agricultural plots sown with corn (C4 plant) in which a portion of the area was reforested with *P. michoacana* (C3 plant). Corn and pine have tissue with different  $\delta^{13}\text{C}$  (Trouve *et al.*, 1994), and thus with the fraction of carbon isotopes, the

(planta C4) en las cuales una porción del área fue reforestada con *P. michoacana* (planta C3). El maíz y el pino tienen tejido con diferente  $\delta^{13}\text{C}$  (Trouve *et al.*, 1994), y esto hace que con la fracción de isótopos del carbono, se obtenga la diferencia en  $\delta^{13}\text{C}$  y el nuevo carbono aportado por el pino que entra al suelo. Este trabajo es el primer estudio desarrollado en México para conocer el potencial de captura de carbono del suelo en reforestaciones de *P. michoacana*, y los resultados son relevantes para cuantificar los impactos de las reforestaciones en los servicios ambientales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Selección de sitios

Se identificaron parcelas reforestadas con *P. michoacana* de 5, 9, 10, 12, 15, 18 y 20 años, con densidades de 625 a 1100 árboles  $\text{ha}^{-1}$ . Se tomó como condición especial que fuese posible identificar la parcela donde se estableció la reforestación y el área de la parcela de referencia, es decir aquella donde se cultiva maíz. Esta condición particular era indispensable porque con las diferencias de  $\delta^{13}\text{C}$  del suelo entre la parcela reforestada y la de referencia se calcula el aporte de nuevo carbono en el suelo proveniente de pino.

Se entrevistó a los dueños de las parcelas para conocer los antecedentes de manejo y se seleccionaron aquellas que nunca recibieron aportes de abono orgánico. Se realizó un pre-muestreo con 5 repeticiones de suelo al azar a una profundidad de 15 cm, en intervalos de 5 cm. Se preparó la muestra y se envió al laboratorio para analizar  $\delta^{13}\text{C}$ . El criterio para la selección de parcelas fue que el historial de manejo fuera coherente con los análisis de  $\delta^{13}\text{C}$  y contenido de materia orgánica del suelo.

### Características de los sitios

Las siete reforestaciones estudiadas se localizan en las regiones de Pátzcuaro, Salvador Escalante y Tzurumútar, en Michoacán, México. La topografía es moderada con pendientes de 5% a 25%. Los suelos son Andosoles y se caracterizan por su alta erosionabilidad, baja densidad aparente, alta retención de fósforo y humedad, y un desarrollo incipiente de estructura (Etchevers *et al.*, 2006). El clima de la zona es C(W), templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual es 15.7 °C y la precipitación anual 1200 mm (INEGI, 2005).

### Muestreo

En las siete parcelas (referencia y reforestadas) se estableció un transecto de muestreo con cinco estaciones. El transecto se orientó en forma diagonal dentro del polígono de la parcela, sin que las estaciones estuvieran dentro de la primera fila de árboles para evitar el efecto de orilla. En cada estación se obtuvieron tres submuestras,

diferencia en  $\delta^{13}\text{C}$  and the new carbon supplied by the pine that enters the soil is obtained. This work is the first study developed in México to learn the potential of soil carbon sequestration in reforestations of *P. michoacana*, and the results are relevant for quantifying the impacts of the reforestations on the environmental services.

## MATERIALS AND METHODS

### Site selection

Plots reforested with *P. michoacana* were identified of 5, 9, 10, 12, 15, 18 and 20 years, with densities of 625 to 1100 trees  $\text{ha}^{-1}$ . It was taken as a special condition that it be possible to identify the plot where the reforestation was established and the area of the reference plot, that is, the one where corn is grown. This particular condition was indispensable, because with the differences of  $\delta^{13}\text{C}$  of the soil between the reforested plot and the reference plot, the addition of new carbon in the soil from pine is calculated.

The owners of the plots were interviewed to know the management antecedents, and a selection was made of those that had never received organic carbon. A random pre-sampling was made with 5 replicates of soil at a depth of 15 cm, in intervals of 5 cm. The sample was prepared and sent to be analyzed for  $\delta^{13}\text{C}$ . The selection criterion of plots was that the management history was coherent with the analyses of  $\delta^{13}\text{C}$  and content of organic matter of the soil.

### Site characteristics

The seven reforestations under study are located in the regions of Pátzcuaro, Salvador Escalante and Tzurumútar, in Michoacán, México. The topography is moderate with slopes from 5% to 25%. The soils are Andisoles and are characterized by high erosionability, low apparent density, high retention of phosphorus and moisture, and an incipient development of structure (Etchevers *et al.*, 2006). The climate of the zone is C(W), sub-humid temperate with rains in summer. The average annual temperature is 15.7 °C and the annual precipitation is 1200 mm (INEGI, 2005).

### Sampling

In the seven plots (reference and reforested) a sampling transect was established with five stations. The transect was oriented diagonally within the polygon of the plot, without having the stations be in the first row of trees to avoid the edge effect. In each station, three subsamples were obtained, within a radius of 3 m, which were mixed in a container, placed in labeled plastic bags and a compound sample was obtained; that is, the total number of subsamples per transect was 15. The sampling depth was at intervals of 5 cm, up to 10 cm. Greater depths were not considered because the results of the pre-sampling for the plot selection indicated that the reforestations under study have had no impact on the soil carbon deeper than 10 cm.

dentro de un radio de 3 m, las cuales se mezclaron en un recipiente, se colocaron en bolsas de plástico identificadas y se obtuvo una muestra compuesta; es decir, el número total de submuestras por transecto fue 15. La profundidad de muestreo fue a intervalos de 5 cm, hasta 10 cm. No se consideraron profundidades mayores porque los resultados del premuestreo para la selección de parcelas indicaron que las reforestaciones estudiadas no han tenido impacto en el carbono del suelo a más de 10 cm.

Las muestras obtenidas para  $\delta^{13}\text{C}$  y densidad aparente se obtuvieron con un muestreador de núcleos de suelo con martillo deslizable AMS<sup>®</sup>, con tres cilindros de acero inoxidable de 5×5 cm de diámetro y altura. En las estaciones de muestreo se tomaron muestras aleatorias de ramas, hojas, corteza y madera de cuatro árboles de pino y se colocaron en bolsas de papel identificadas para determinar un valor promedio de  $\delta^{13}\text{C}$  en la biomasa de pino.

Como un indicador de la presencia de carbonatos (carbono inorgánico) en el suelo, se probó la reactividad al ácido clorhídrico (HCl, 5%) y se midió el pH. Ninguna muestra reaccionó al HCl, ni tuvo valores de pH mayores que 7, lo que sugirió escasa o nula presencia de carbonatos y, por tanto, no se justificó el lavado del suelo con HCl (Yoneyama *et al.*, 2001).

#### Análisis de muestras vegetales

Las muestras vegetales recolectadas se secaron a 70 °C en una estufa con circulación forzada de aire, se molieron en un molino convencional, se agruparon por parcela reforestada, se mezclaron y se tamizaron con una malla de 1 mm. Para mayor homogeneización, las muestras se pulverizaron en un molino de balines a 120 rpm durante 36 h y se tamizaron con una malla de 0.05 mm. Se pesó 1.5 mg de muestra pulverizada y se colocó en una cápsula de estaño. Las cápsulas se sellaron manualmente usando fórceps, se evitó la contaminación entre muestras y se enviaron al Laboratorio de Isótopos de la Universidad de California, Davis, EE.UU., para determinar  $\delta^{13}\text{C}$  y contenido de carbono.

#### Análisis de muestras de suelos

Los análisis de suelo incluyeron: 1) determinación de  $\delta^{13}\text{C}$ ; 2) determinación de carbono total; 3) densidad aparente. Para analizar  $\delta^{13}\text{C}$ , las muestras se secaron a 70 °C por 72 h, se tamizaron en una malla de 2 mm y las raíces finas que pasaron esta malla se removieron con fórceps. La muestra se pulverizó en un molino de balines a 120 rpm por 20 h para obtener el paso por una malla de 0.05 mm. Se realizó un análisis previo para determinar el porcentaje de carbono orgánico total a fin de preparar muestras en cápsulas de estaño que contuvieran aproximadamente 800  $\mu\text{g}$  de carbono. Lo anterior, dadas las especificaciones de funcionamiento óptimo del equipo de espectrofotometría.

Los núcleos de suelo recolectados en campo se secaron a 105 °C por 24 h. La relación masa/volumen se determinó con el peso en seco del suelo y el volumen de cilindros de 5×5 cm. En ningún caso se presentaron piedras dentro de las muestras.

The samples obtained for  $\delta^{13}\text{C}$  and apparent density were obtained with a sampler of soil nuclei with an AMS<sup>®</sup> sliding hammer, with three stainless steel cylinders of 5×5 cm diameter and height. Random samples were taken in the sampling stations of branches, leaves, bark and wood from four pine trees and then were placed in labeled paper bags to determine an average value of  $\delta^{13}\text{C}$  in the pine biomass.

As an indicator of the presence of carbonates (inorganic carbon) in the soil, the reactivity to hydrochloric acid (HCl, 5%) was tested, and the pH was measured. None of the samples reacted to the HCl, nor had values of pH higher than 7, which suggested scant or null presence of carbonates, and therefore, washing the soil with HCl was not justified (Yoneyama *et al.*, 2001).

#### Analysis of vegetable samples

The collected vegetable samples were dried at 70 °C in an oven with forced air circulation, ground in a conventional mill, grouped per reforested plot, mixed and sieved with a 1 mm mesh. For greater homogenization, the samples were pulverized in a ball mill at 120 rpm during 36 h and were sieved with a 0.05 mm mesh. Then, 1.5 mg of pulverized sample was weighed and placed in a tin capsule. The capsules were manually sealed using forceps, and contamination among samples was avoided. The capsules were sent to the Isotope Laboratory of the University of California, Davis, U.S.A., to determine  $\delta^{13}\text{C}$  and carbon content.

#### Analysis of soil samples

The soil analyses included: 1) determination of  $\delta^{13}\text{C}$ ; 2) determination of total carbon; 3) apparent density. To analyze  $\delta^{13}\text{C}$ , the samples were dried at 70 °C during 72 h, were sieved in a mesh of 2 mm, and the fine roots that passed through this mesh were removed using forceps. The sample was pulverized in a ball mill at 120 rpm during 20 h. A previous analysis was carried out to determine the percentage of total organic carbon in order to prepare samples in tin capsules that contained approximately 800  $\mu\text{g}$  of carbon. The above was carried out given the specifications of optimum functioning of the spectrophotometry equipment.

The soil nuclei collected in the field were dried at 105 °C for 24 h. The relationship mass/volume was determined with the dry weight of the soil and the volume of cylinders of 5×5 cm. No stones appeared in any of the samples.

#### Determination of soil organic carbon

The fraction of new soil carbon (NSC) was calculated with Equation 2, which represents a simple mixture model (Trouve *et al.*, 1994; Yoneyama *et al.*, 2001; Bernoux *et al.*, 1998). The formula is:  $NSC = (\delta - \delta_0) / (\delta_1 - \delta_0)$ , where: NSC = fraction corresponding to the new carbon in the soil;  $\delta = \delta^{13}\text{C}$  of the soil at the time of evaluation;  $\delta_0 = \delta^{13}\text{C}$  of the soil in zero time (reference plot);  $\delta_1 = \delta^{13}\text{C}$  of the source that transfers new carbon to the soil (pine biomass).

### Determinación del carbono orgánico del suelo

La fracción de nuevo carbono del suelo (*NCS*) se determinó con la Ecuación 2 que representa un modelo simple de mezclas (Trouve *et al.*, 1994; Yoneyama *et al.*, 2001; Bernoux *et al.*, 1998). La fórmula es:  $NCS = (\delta - \delta_0) / (\delta_1 - \delta_0)$ , donde: *NCS* = fracción correspondiente al nuevo carbono en el suelo;  $\delta = \delta^{13}C$  del suelo al tiempo de la evaluación;  $\delta_0 = \delta^{13}C$  del suelo en tiempo cero (parcela de referencia);  $\delta_1 = \delta^{13}C$  de la fuente que transfiere nuevo carbono al suelo (biomasa de pino).

La masa de carbono orgánico del suelo (*COS*) a una profundidad determinada se calculó con la ecuación:  $COS = (Fcs) \times (Da) \times Pr \times (1 - (Fp)) \times 10\,000$ , donde *COS* = carbono orgánico en  $Mg\ ha^{-1}$ ; *Fcs* = fracción de carbono orgánico del suelo (adimensional); *Da* = densidad aparente del suelo en  $Mg\ m^{-3}$ ; *Pr* = profundidad del suelo en m (0.05 m por capa); *Fp* = fracción de pedregosidad (adimensional); 10 000 = factor de conversión de  $m^{-2}\ ha^{-1}$ .

La masa de nuevo carbono proveniente de la reforestación de pino (*NCOS*) se calculó de la siguiente forma:  $NCOS = COS \times NCS$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Dinámica de $\delta^{13}C$

El valor promedio de  $\delta^{13}C$  de las parcelas de referencia fue  $-21.27$  y  $-21.00\%$ , en las profundidades 0-5 y 5-10 cm, y  $-22.97$  y  $-21.71\%$  en las parcelas reforestadas en las mismas profundidades. La prueba de *t* indicó que los valores de  $\delta^{13}C$  del grupo de parcelas de referencia y el de las reforestaciones fueron estadísticamente diferentes en ambas profundidades ( $p \leq 0.0001$ ;  $p \leq 0.001$ ). Las diferencias fueron  $-1.7\%$ , y  $0.70\%$  (Figura 1).

Como las parcelas de referencia presentaron valores de  $\delta^{13}C$  en el intervalo de  $-20.9$  a  $-21.64\%$  y  $-20.71$  a  $-21.29$  en las profundidades de 0-5 y 5-10 cm; se tomó un valor medio como referencia porque es un parámetro de localización y hay mayor frecuencia de los datos alrededor de la media. Se consideró el cambio de  $\delta^{13}C$  entre parcelas para conocer la dilución exacta aportada por la nueva fuente de carbono menos enriquecida. El valor medio (tiempo cero) fue  $-21.27\%$  y  $-21.00\%$  en las profundidades 0-5 y 5-10 cm (Figura 2). El modelo de la Figura 2 involucra la transformación logarítmica de los valores, y para fines de representación se graficó el valor de la parcela de referencia en el año uno. Se hubiera esperado valores menos negativos debido al continuo cultivo de maíz, ya que su  $\delta^{13}C$  de  $-12$  a  $-13\%$ ; sin embargo, es probable que la práctica común de los productores de retirar los residuos de cosecha en vez de incorporarlos al suelo, y la presencia de malezas de tipo C3 no controladas, influyeran en estos valores.

The mass of soil organic carbon (*SOC*) at a determined depth was calculated with the following equation:  $SOC = (Fsc) \times (Da) \times Pr \times (1 - (Fp)) \times 10\,000$ , where *SOC* = organic carbon in  $Mg\ ha^{-1}$ ; *Fsc* = fraction of soil organic carbon (adimensional); *Da* = apparent soil density in  $Mg\ m^{-3}$ ; *Pr* = soil depth in m (0.05 m per layer); *Fp* = stone fraction (adimensional); 10 000 = conversion factor from  $m^{-2}$  to  $ha^{-1}$ .

The mass of new carbon from the pine reforestation (*NSOC*) was calculated with the following formula:  $NCOS = COS \times NCS$ .

## RESULTS AND DISCUSSION

### Dynamics of $\delta^{13}C$

The average value of  $\delta^{13}C$  of the reference plots was  $-21.27$  and  $-21.00\%$ , at the depths of 0-5 and 5-10 cm, and  $-22.97$  and  $-21.71\%$  in the reforested plots at the same depths. The *t* test indicated that the values of  $\delta^{13}C$  of the group of reference plots and of the reforestation plot were statistically different at both depths ( $p \leq 0.0001$ ;  $p \leq 0.001$ ). The differences were  $-1.7\%$ , and  $0.70\%$  (Figure 1).

As the reference plots presented values of  $\delta^{13}C$  in the interval of  $-20.9$  to  $-21.64\%$  and  $-20.71$  to  $-21.29\%$  at the depths of 0.5 and 5-10 cm; a mean value was taken as reference because it is a location parameter and there is greater frequency of the data around the mean. The change of  $\delta^{13}C$  among plots was considered to know the exact dilution supplied by the new source of less enriched carbon. The mean value (zero time) was  $-21.27$  and  $-21.00\%$  at the depths 0-5 and 5-10 cm (Figure 2). The model of

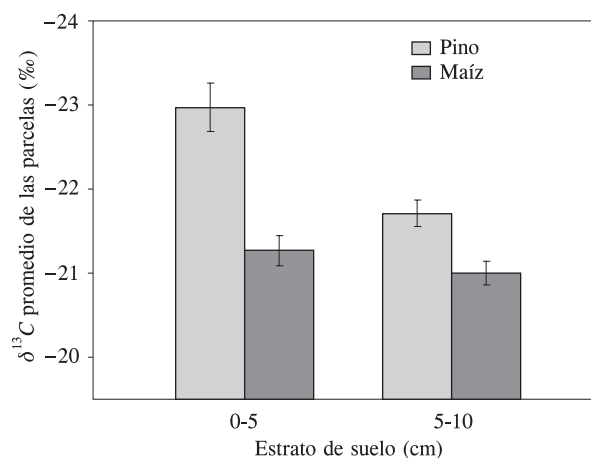


Figura 1. Valor promedio de la  $\delta^{13}C$  del carbono orgánico del suelo en las parcelas de referencia y reforestadas a 10 cm de profundidad. Las barras verticales muestran la desviación estándar.

Figure 1. Average value of the  $\delta^{13}C$  of the organic soil carbon in the reference plots and reforestations at 10 cm depth. Vertical bars show the standard deviation.

La tendencia del enriquecimiento de  $^{13}\text{C}$  a disminuir con el tiempo en los dos niveles de profundidad (0-5, 5-10 cm) fue evidente. El cambio calculado con el modelo obtenido en la Figura 2 fue 2.3‰ en 20 años en la capa 0-5 cm de profundidad y la tasa de 0.11 ‰ año<sup>-1</sup>. El cambio de  $\delta^{13}\text{C}$  a valores más negativos es el esperado y se explica por un efecto de dilución que resulta al entrar al suelo una fuente menos enriquecida en  $^{13}\text{C}$ , como la materia orgánica de *P. michoacana*. Trouve *et al.* (1994) calcularon en esta profundidad un cambio de 12‰ en reforestaciones de *P. caribaea* de 28 años de establecidas, con un tasa de 0.48‰ año<sup>-1</sup> que es cuatro veces mayor a la de este estudio. Los mismos autores reportaron un cambio de 12‰ a una profundidad de 0-5 cm en plantaciones de un híbrido de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* vs *E. saligna*) de 19 años. Las diferencias de  $\delta^{13}\text{C}$  en el presente estudio son bajas comparadas con las de estos autores; sin embargo, la significancia estadística encontrada en nuestro estudio sugiere que las parcelas de referencia han alcanzado valores de equilibrio de  $\delta^{13}\text{C}$  que permiten detectar el ingreso de nuevo carbono.

En la profundidad 5-10 cm, el modelo indica un cambio de 1.0‰ en 20 años (Figura 2), que corresponde a una tasa 0.04‰ año<sup>-1</sup>. Esta diferencia en  $\delta^{13}\text{C}$  es casi tres veces menor que la encontrada en la profundidad 0-5 cm. Este resultado se debe a que la interacción del suelo con el material orgánico adicionado en la superficie disminuye con la profundidad (Balesdent *et al.*, 1987; Trouve *et al.*, 1994).

### Dinámica del nuevo COS capturado, expresado en concentración

La incorporación de nuevo carbono (Figura 3) se atribuye a los aportes al suelo que hace la reforestación a través de la hojarasca. El modelo indica que a los 20 años, el porcentaje de carbono proveniente de pino fue 61.8% y 17.6% en los estratos 0-5 y 5-10 cm. Garten Jr. (2002) encontró que en una plantación *Pinus taeda* el nuevo carbono en la profundidad 0-40 cm, a cinco y ocho años fue de 7.5% y 54%. En plantaciones de once años de *Platanus occidentalis* y *Liquidambar styraciflua*, la ganancia de carbono orgánico en la misma profundidad fue 11 y 26% (Garten Jr., 2002). En cultivos con maíz el porcentaje de nuevo carbono en el suelo en la profundidad de 0-30 cm a los 23 años fue aproximadamente 27% (Balesdent *et al.*, 1987). Aunque el maíz y el pino difieren en sus tasas de aporte de carbono al suelo, estos datos indican que el porcentaje de nuevo carbono encontrado en este estudio es comparativamente similar al de otros trabajos.

Figure 2 involves the logarithmic transformation of the values, and for purposes of representation, the value of the reference plot was graphed in year one. Less negative values would have been expected due to the continuous cultivation of corn, given that its  $\delta^{13}\text{C}$  is -12 to -13‰; however, it is likely that the common practice of the producers of removing the harvest residues instead of incorporating them into the soil, and the presence of uncontrolled type C3 weeds, influenced these values.

The tendency of the enrichment of  $\delta^{13}\text{C}$  to decrease with time in both levels of depth (0-5, 5-10 cm) was evident. The change calculated with the model obtained in Figure 2 was of 2.3‰ in 20 years in the layer 0-5 cm of depth and the rate of 0.11‰ year<sup>-1</sup>. The change of  $\delta^{13}\text{C}$  to more negative values is expected and is explained by an effect of dilution that results when a source that is less enriched in  $^{13}\text{C}$  is incorporated into the soil, such as the organic material of *P. michoacana*. Trouve *et al.* (1994) calculated at this depth a change of 12‰ in reforestations of *P. caribaea* of 28 years establishment, with a rate of 0.48‰ year<sup>-1</sup>, which is four times higher than that of the present study. The same authors reported a change of 12‰ at a depth of 0-5 cm in plantations of a eucalyptus hybrid (*Eucalyptus urophylla* vs *E. saligna*) of 19 years. The differences of  $\delta^{13}\text{C}$  in our study are low compared with those of these authors. However, the statistical significance found in our study suggests that the reference plots have reached

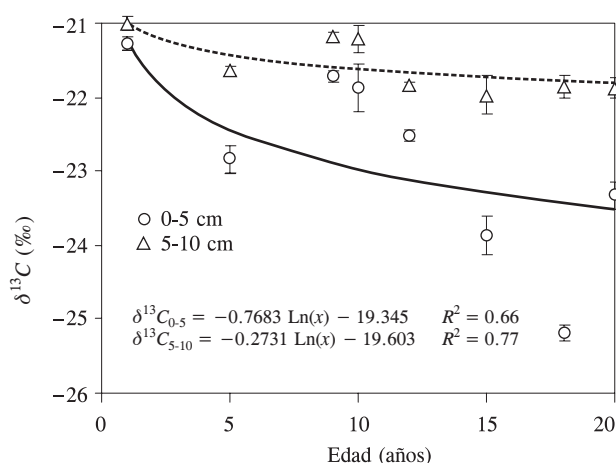


Figura 2. Dinámica de la  $\delta^{13}\text{C}$  del carbono orgánico del suelo en el estrato de 0-5 cm (○) y 5-10 cm (△) por reforestaciones de *Pinus michoacana*. La parcela de referencia está en el año uno y las barras indican el error estándar.

Figure 2. Dynamics of the  $\delta^{13}\text{C}$  of the soil organic carbon in the stratum 0-5 cm (○) and 5-10 cm (△) through reforestations of *Pinus michoacana*. The reference plot is in year one and the bars indicate the standard error.

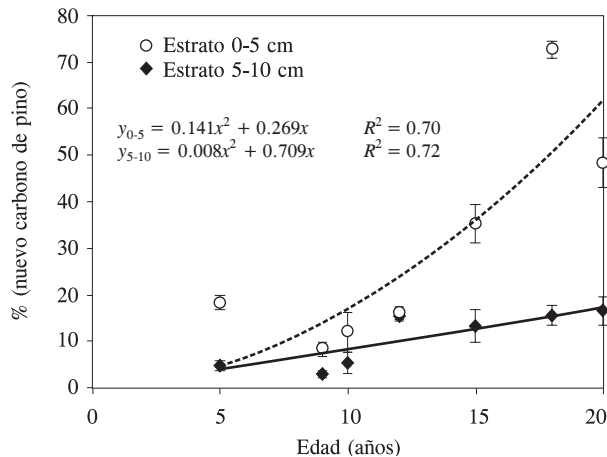


Figura 3. Concentración de carbono orgánico capturado en el suelo por *Pinus michoacana*. Las barras indican el error estándar.

Figure 3. Concentrations of organic carbon sequestered in the soil by *Pinus michoacana*. Bars are for standard error.

#### Dinámica del COS total y NCOS capturado, expresado en masa

El contenido de carbono total ajustado por densidad aparente, y el porcentaje de nuevo carbono no tuvieron relación directa por el intervalo amplio de la densidad aparente ( $0.48\text{-}1.14 \text{ Mg m}^{-3}$ ) (Cuadro 1).

Los datos del Cuadro 1 se graficaron, se ajustaron a un modelo polinomial o exponencial según la tendencia, y se obtuvo la tendencia de acumulación del COS con respecto al tiempo (Figura 4). En la primera profundidad, los valores observados de masa de carbono indican que en las reforestaciones con *P. michoacana* existe pérdidas entre nueve y diez años después de su establecimiento (Figura 4). Estas pérdidas de COS por el cambio de uso agrícola a forestal han sido reportadas por Trouve *et al.* (1994), Markewitz *et al.* (2002) y Guo y Gifford (2002); y se atribuyen a la mayor descomposición de materia orgánica (Boutton, 1991b).

En las parcelas de referencia, el contenido promedio de COS en los estratos 0-5 y 5-10 cm fue  $10.25 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $10.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Este resultado coincide con el estudio de Salinas-García *et al.* (2001) quienes determinaron  $10.9 \text{ Mg ha}^{-1}$  de COS en parcelas de maíz en la profundidad 0-5 cm en la misma región.

Cuando el cultivo de maíz, sin incorporación de residuos de cosecha, se sustituyó por una reforestación de *P. michoacana*, el almacenamiento de COS en la profundidad 0-5 cm fue  $10.25 \text{ Mg ha}^{-1}$ , y el carbono adicionado por la reforestación aumentó en  $9.47 \text{ Mg ha}^{-1}$  en 20 años de acuerdo con el modelo exponencial (Figura 4). Es decir, aunque al inicio los valores

equilibrium values of  $\delta^{13}\text{C}$  that permit the detection of the introduction of new carbon.

At the depth of 5-10 cm, the model indicates a change of  $1.0\%$  in 20 years (Figure 2), which corresponds to a rate of  $0.04\%$  year<sup>-1</sup>. This difference in  $\delta^{13}\text{C}$  is nearly three times less than that found at depths of 0-5 cm. This result is due to the fact that the interaction of the soil with the organic material added to the surface decreases with depth (Balesdent *et al.*, 1987; Trouve *et al.*, 1994).

#### Dynamics of the new sequestered SOC, expressed in concentration

The incorporation of new carbon (Figure 3) is attributed to the contributions to the soil from the reforestation through the litter. The model indicates that at 20 years, the percentage of carbon from pine was 61.8% and 17.6% in the strata 0-5 and 5-10 cm. Garten Jr. (2002) found that in a *Pinus taeda* plantation, the new carbon at the depth 0-40 cm, at five and eight years was of 7.5% and 54%. In plantations of 11 years of *Platanus occidentalis* and *Liquidambar styraciflua*, the gain of organic carbon at the same depth was 11 and 26% (Garten Jr., 2002). In corn crops the percentage of new carbon in the soil at the depth of 0-30 cm at 23 years was approximately 27% (Balesdent *et al.*, 1987). Although corn and pine differ in their rates of soil carbon contribution, these data indicate that the percentage of new carbon found in this study is comparatively similar to that of other works.

#### Dynamics of total SOC and sequestered NSOC, expressed in mass

The content of total carbon adjusted by apparent density, and the percentage of new carbon did not have a direct relationship due to the wide interval of the apparent density ( $0.48\text{-}1.14 \text{ Mg m}^{-3}$ ) (Table 1).

The data of Table 1 were graphed, a polynomial or exponential model was adjusted according to the tendency, and the accumulation tendency was obtained of the SOC with respect to time (Figure 4). At the first depth, the values observed of carbon mass indicate that in the reforestations with *P. michoacana* there are losses between nine and ten years after its establishment (Figure 4). These losses of SOC due to the change from agricultural to forest use have been reported by Trouve *et al.* (1994), Markewitz *et al.* (2002) and Guo and Gifford (2002) and are attributed to the greater decomposition of organic material (Boutton, 1991b).

In the reference plots, the average content of SOC in the depths 0-5 and 5-10 cm was  $10.25 \text{ Mg ha}^{-1}$  and  $10.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ . This result coincides with the study of

**Cuadro 1. Carbono acumulado en parcelas con cultivo de maíz y con nuevo uso de suelo a reforestación con *Pinus michoacana*.**  
**Table 1. Accumulated carbon in plots planted with corn and with new land use to reforestation with *Pinus michoacana*.**

Edad (años)	Uso de suelo	Da <sup>†</sup> (Mg m <sup>-3</sup> )	0 a 5 cm COS <sup>§</sup> Mg ha <sup>-1</sup>	Nuevo COS <sup>§</sup> capturado (%)	Da <sup>†</sup> (Mg m <sup>-3</sup> )	5 a 10 cm COS <sup>§</sup> Mg ha <sup>-1</sup>	Nuevo COS <sup>§</sup> capturado (%)
5	Maíz	0.65	9.49	18.30	0.68	10.54	4.70
	Pino	0.53	10.17		0.63	10.08	
9	Maíz	0.55	14.28	8.30	0.57	14.21	3.00
	Pino	0.60	14.79		0.60	13.50	
10	Maíz	0.54	11.34	12.00	0.56	11.70	5.20
	Pino	0.48	13.20		0.50	12.75	
12	Maíz	0.55	13.47	15.90	0.57	13.68	15.40
	Pino	0.58	12.18		0.59	12.09	
15	Maíz	0.87	5.22	35.19	0.95	5.70	13.34
	Pino	1.04	7.80		1.14	5.70	
18	Maíz	0.58	13.05	72.70	0.58	13.05	15.50
	Pino	0.49	17.15		0.61	13.42	
20	Maíz	0.69	4.83	48.39	0.69	4.08	16.50
	Pino	1.05	16.80		0.97	7.27	

<sup>†</sup> Densidad aparente; <sup>§</sup> Carbono orgánico del suelo.

observados muestran una tendencia a perder carbono, este reservorio casi se duplica a los 20 años en la profundidad 0-5 cm. El *NCOS* se graficó con los datos del Cuadro 1 y se ajustó una ecuación con respecto al tiempo (Figura 4). Los modelos se calcularon para obtener una tendencia, pero no son extrapolables.

El *NCOS* medido directamente en la reforestación de 5 años, fue mayor al calculado en las de 9, 10 y 12 años y esta disminución la describe el modelo ajustado (Figura 4). La mayor cantidad de carbono en la reforestación de 5 años puede deberse a que en las reforestaciones jóvenes, antes del cierre de copas, el estrato herbáceo, que incluye varias especies C3, es más abundante debido a un mayor acceso a la luz. Woods *et al.* (1992) documentaron que en reforestaciones de *Pinus radiata* de 2 a 3 años con abundante estrato herbáceo en la profundidad 0-15 cm se aportan hasta 3.90 Mg ha<sup>-1</sup> de *COS*.

La tasa de acumulación de *NCOS* por el cambio de uso de suelo de maíz a *P. michoacana* en las profundidades 0-5 y 5-10 cm fue 0.561 y 0.115 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Estas tasas de acumulación se determinaron con los cálculos de *NCOS* a 20 años. Los resultados indican que se incorporaron 0.676 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a una profundidad de 0 a 10 cm. Markewitz *et al.* (2002) reportaron datos de *NCOS* en una plantación de *Pinus palustris* de 14 años en la profundidad 0-10 cm, con los que se calculó una tasa de 0.78 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; esta tasa es 15% superior a la calculada para *P. michoacana*. Las tasas reportadas por Paul *et al.* (2003) concuerdan con las reportadas en este estudio, alcanzando un valor de *NCOS*

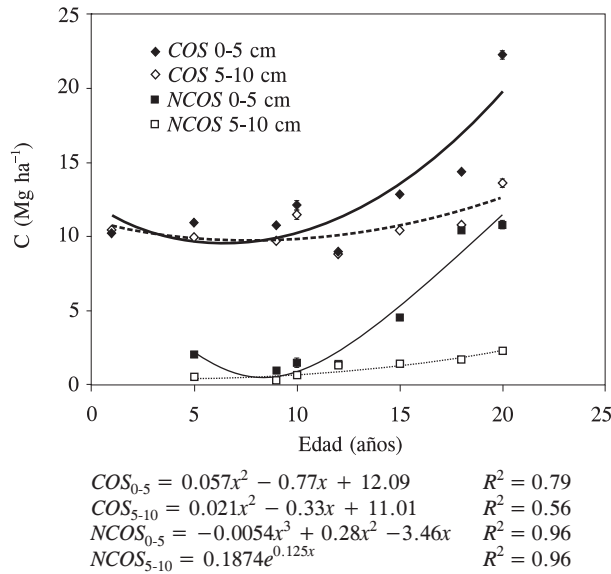
Salinas-García *et al.* (2001), who determined 10.9 Mg ha<sup>-1</sup> of *SOC* in corn plots at the depth of 0-5 cm in the same region.

When the corn crop, without the incorporation of harvest residue, was substituted by a reforestation of *P. michoacana*, the storage of *SOC* at the depth 0-5 cm was 10.25 Mg ha<sup>-1</sup>, and the carbon added by the reforestation increased by 9.47 Mg ha<sup>-1</sup> in 20 years according to the exponential model (Figure 4). That is, although at the beginning the observed values show a tendency to lose carbon, this reservoir was nearly doubled at 20 years at the depth of 0-5 cm. The *NSOC* was graphed with the data of Table 2 and an equation was adjusted with respect to time (Figure 4). The models were calculated to obtain a tendency, but they cannot be extrapolated.

The *NSOC* measured directly in the reforestation at 5 years, was greater than that calculated in those of 9, 10 and 12 years, and this reduction is described by the adjusted model (Figure 4). The higher amount of carbon in the reforestation of 5 years may be due to the fact that in the young reforestations, before the closing of crowns, the herbaceous stratum, which includes various C3 species, is more abundant because of a greater access to the light. Woods *et al.* (1992) documented that in reforestations of *Pinus radiata* of 2 to 3 years with abundant herbaceous stratum at the depth of 0-15 cm, as much as 3.90 Mg ha<sup>-1</sup> of *SOC* are supplied.

The accumulation rate of *NSOC* due to the change of soil use from corn to *P. michoacana* at the depths of





**Figura 4.** Carbono orgánico del suelo (COS) y nuevo carbono orgánico del suelo (NCOS) en las profundidades de 0-5 y 5-10 cm en reforestaciones de *Pinus michoacana*. Las barras indican el error estándar. La barra del error estándar no se muestra cuando es menor que el tamaño del símbolo.

**Figure 4.** Soil organic carbon (SOC) and new soil organic carbon (NSOC) at depths of 0-5 and 5-10 cm in reforestations of *Pinus michoacana*. Bars indicate the standard error. The bar of the standard error is not shown when it is smaller than the size of the symbol.

en la profundidad 0-41 cm de  $0.56 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en *Pinus resinosa* después de 32 años. Garten Jr. (2002) calculó una tasa de NCOS en la profundidad 0-40 cm en el intervalo de  $0.4\text{-}1.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en *P. taeda* después de 10 años. Las tasas de acumulación encontradas en este trabajo están en el intervalo reportado para otros trabajos. Nosetto *et al.* (2006) no encontraron diferencias en carbono del suelo 15 años después de reforestar con *Pinus ponderosa*, aunque el reservorio de biomasa de raíz aumentó el carbono subterráneo en  $0.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En una revisión de 43 estudios con 204 sitios Paul *et al.* (2002) calcularon tasas de cambio de COS de  $-0.005$  a  $0.322 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en reforestaciones mayores a 31 años, dependiendo de si los cálculos se realizaban para una profundidad de 10 o 30 cm de suelo superficial. Las tendencias indican que la acumulación de COS es influenciada por la edad de los árboles y que, en general, las reforestaciones menores de 5 años tienen cambios negativos de COS de  $-0.601$  a  $-0.178 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

En la profundidad de 5-10 cm el COS en la parcela de referencia fue  $10.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; sin embargo, *P. michoacana* aún no ha acumulado esta cantidad en nuevo carbono porque la tasa de incorporación de carbono orgánico al suelo por esta especie es un proceso más

0-5 and 5-10 cm was  $0.561$  and  $0.115 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . These accumulation rates were determined with the calculations of NSOC at 20 years. Results indicate that  $0.676 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  were incorporated at a depth of 0 to 10 cm. Markewitz *et al.* (2002) reported data of NSOC in a plantation of *Pinus palustris* of 14 years at the depth 0-10 cm, with which a rate of  $0.78 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  was calculated; this rate is 15% higher than that calculated for *P. michoacana*. The rates reported by Paul *et al.* (2003) concur with those reported in the present study, reaching a value of NSOC at the depth 0-41 cm of  $0.56 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  in *Pinus resinosa* after 32 years. Garten Jr. (2002) calculated a rate of NSOC at the depth 0-40 cm in the interval of  $0.4\text{-}1.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  in *P. taeda* after 10 years. The accumulation rates found in this work are within the interval reported in other works. Nosetto *et al.* (2006) found no differences in the soil carbon 15 years after reforesting with *Pinus ponderosa*, although the root biomass reservoir increased the below ground carbon in  $0.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . In a revision of 43 studies with 204 sites, Paul *et al.* (2002) calculated rates of exchange of SOC of  $-0.005$  to  $0.322 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  in reforestations of over 31 years, depending whether the calculations were made for a depth of 10 or 30 cm of surface soil. The tendencies indicate that the accumulation of SOC is influenced by the age of the trees, and that in general, the reforestations of under 5 years have negative changes of SOC of  $-0.601$  to  $-0.178 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ .

At the depth of 5.10 cm, the SOC in the reference plot was  $10.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; however, *P. michoacana* has still not accumulated this amount in new carbon because the incorporation rate of organic carbon to the soil by this species is a slower process at this depth (Figure 4). The average accumulation rate of NSOC at the depth 0-10 cm is  $0.676 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  according to the exponential model (Figure 4). Some factors that increase the accumulation of SOC when the land use is changed are the changes in the content of organic material, decomposition rate, labile carbon fraction, physical protection through other intra-aggregates or mineral organ complexes (Post and Kwon, 2000).

The results of this study are consistent with the tendencies observed in other studies where the balance of carbon at the start of the reforestations can be negative, but the recuperation to original levels occurs after 20 years. Although the amounts of carbon that are gained are relatively small compared with the carbon gains in the aboveground biomass, it is important to point out that the carbon gained in the soil will be reflected in the soil quality and the services that a forest system can provide.

lento en esta profundidad (Figura 4). La tasa promedio de acumulación de *NCOS* en la profundidad 0-10 cm es  $0.676 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de acuerdo con el modelo exponencial (Figura 4). Algunos factores que aumentan la acumulación de *COS* al cambiar el uso del suelo son los cambios en el contenido de materia orgánica, tasa de descomposición; fracción lábil de carbono, protección física a través de otros intra-agregados o complejos órgano minerales (Post y Kwon, 2000).

Los resultados de este trabajo son consistentes con las tendencias observadas en otros estudios donde el balance de carbono al inicio de las reforestaciones puede ser negativo pero la recuperación a niveles originales ocurre después de 20 años. Aunque las cantidades ganadas de carbono son relativamente pequeñas comparadas con las ganancias de carbono en biomasa aérea, es importante resaltar que el carbono ganado en el suelo se reflejará en la calidad del suelo y los servicios que un sistema forestal pueda proveer.

### CONCLUSIONES

Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  del grupo de parcelas de referencia y el de reforestaciones con *Pinus michoacana* fueron estadísticamente diferentes en las profundidades 0-5 y 5-10 cm. La fracción de nuevo carbono en estas profundidades fue 61.8 y 17.6% y la tasa de acumulación de nuevo carbono orgánico en la profundidad 0-10 cm fue  $0.588 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La tendencia del modelo ajustado en los primeros 5 cm de suelo indicó que las reforestaciones con *P. michoacana* reducen la ganancia de carbono del suelo en los primeros cinco años de establecidas, pero éstas se duplican a los 20 años.

### AGRADECIMIENTOS

Al fondo sectorial CONACYT-CONAFOR a través del proyecto 10711 por el financiamiento otorgado.

### LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez, J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Arnalds A. 2004. Carbon sequestration and the restoration of land health: an example from Iceland. *Climatic Change* 65: 333-346.
- Balesdent J., A. Mariotti, and B. Guillet. 1987. Natural  $^{13}\text{C}$  abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 19:25-30.
- Balesdent J., G. H. Wagner, and A. Mariotti. 1988. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by Carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 118-124.
- Bekele A., and W. H. Hudnall. 2003. Stable isotope study of the prairie-forest transition soil in Louisiana. *Soil Sci.* 168: 783-792.

### CONCLUSIONS

The values of  $\delta^{13}\text{C}$  of the group of reference plots and that of the reforestations with *Pinus michoacana* were statistically different at the depths of 0-5 and 5-10 cm. The fraction of new carbon at these depths was 61.8 and 17.6%, and the accumulation rate of new organic carbon at the depth 0-10 cm was  $0.588 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . The tendency of the adjusted model in the first 5 cm of soil indicated that the reforestations with *P. michoacana* reduce the carbon gain of the soil in the first five years of establishment, but this is doubled at 20 years.

—End of the English version—



- Bernoux, M., C. C. Cerri, C. Neill, and J. F. L. de Moraes. 1998. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma* 82: 43-58.
- Boutton W., T. 1991a. Stable carbon isotope ratios of natural materials: I. Sample preparation and mass spectrometric analysis. *In: Carbon Isotope Techniques.* Coleman, D. C., and B. Fry (eds). Academic Press Inc., San Diego, California. pp: 155-171.
- Boutton W., T. 1991b. Stable carbon isotope ratios of natural materials: Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments. *In: Carbon Isotope Techniques.* Coleman, D. C., and B. Fry (eds). Academic Press Inc., San Diego, California. pp: 155-171.
- Craig, H. 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica Cosmochimica Acta* 12: 133-149.
- Ehleringer J. R., and P. W. Rundel. 1989. Stable isotopes: history, units, and instrumentation. *In: Stable Isotopes in Ecological Research.* Rundel P. W., J. R. Ehleringer, and K. A. Nagy (eds). Springer-Verlag, New York. pp: 1-15.
- Etchevers, B. J. D., C. Prat, C. Balbontin, M. Bravo, and M. Martínez. 2006. Influence of land use on carbon sequestration and erosion in Mexico, a review. *Agronomie* 26: 1-9.
- García-Oliva F., and O. R. Masera. 2004. Assessment and measurement issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-use change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto protocol. *Climatic Change* 65: 347-364.
- Garten Jr., C. T. 2002. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. *Biomass and Bioenergy* 23: 93-102.
- Guo L. B., and R. M. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.* 8: 345-360.
- Markewitz, D., F. Sartori, and C. Craft. 2002. Soil change and carbon storage in longleaf pine stands planted on marginal agricultural lands. *Ecol. Applications* 12(5): 1276-1285.
- Nosetto, M. D., E. G. Jobbágy, and J. M. Paruelo. 2006. Carbon sequestration in semi-arid rangelands: comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *J. Arid Environ.* 67: 142-156.
- Paul E. A., S. J. Morris, J. Six, K. Paustian, and E. G. Gregorich. 2003. Interpretation of soil carbon and nitrogen dynamics in agricultural and afforested soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1620-1628.
- Paul, K. I., P. J. Polglase, J. G. Nyakuengama, and P. K. Khanna. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *For. Ecol. Manag.* 168: 241-257.

- Peterson, B., and B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Ann. Rev. Ecol. Systematics* 18: 293-320.
- Post, W. M., and K. C. Kwon. 2000. Soil carbon sequestration and land use-change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6: 317-327.
- Resh, S. C., D. Binkley, and J. A. Parrotta. 2002. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus* species. *Ecosystems* 5: 217-231
- Salinas-García, J. R., A.D. Baez-González, M. Tiscareño-López, and E. Rosales-Robles. 2001. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil & Tillage Res.* 59: 67-69.
- Seppänen, P. 2002. Secuestro de carbono a través de reforestaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta veracruzana* 4(2): 51-58.
- Trouve, C., A. Mariotti, D. Schwartz, and B. Guillet. 1994. Soil organic carbon dynamics under *Eucalyptus* and *Pinus* planted on savannas in the Congo. *Soil Biol. Biochem.* 26(2): 287-295.
- Woods, P. V., E. K. S Nambiar, and P. J. Smethurst. 1992. Effect of annual weeds on water and nitrogen availability to *Pinus radiata* trees in a young plantation. *For. Ecol. Manag.* 48, 145-163.
- Yoneyama, T., Y. Nakanishi, A. Morita, and B. C. Liyanage. 2001.  $\delta^{13}\text{C}$  Values of organic carbon in cropland and forest soils in Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47(1): 17-26.