

# Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México

## Carbon stored in different coffee agroforestry systems in Huatusco, Veracruz, Mexico

Aiko Masuhara<sup>1</sup>, Eduardo Valdés<sup>2</sup>, Joel Pérez<sup>2</sup>, Diego Gutiérrez<sup>3</sup>, José Cutberto Vázquez<sup>2</sup>,  
Eduardo Salcedo<sup>4</sup>, María de Jesús Juárez<sup>2</sup> y Agustín Merino<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Sección de Cambio Climático. Museo de Ciencias de Tokio, Japón

<sup>2</sup>Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México

<sup>3</sup>Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Pastaza, Ecuador

<sup>4</sup>Departamento de Madera, Celulosa y Papel, CUCBA, Universidad de Guadalajara Campus Zapopan, Jalisco, México

<sup>5</sup>Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela Campus Lugo, Galicia, España

---

### Resumen

El potencial de la captura de carbono (C) en el sector agrícola y forestal para mitigar los efectos del cambio climático es significativo. Los sistemas agroforestales tienen una ventaja estratégica importante para la captación de C, debido al contenido potencial de este elemento en las múltiples especies de plantas que conviven simultáneamente en ellos. El objetivo general de este estudio fue determinar el C almacenado en los estratos aéreos y en el suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en Huatusco, Veracruz. Los resultados indican que el sistema con mayor contenido de C total fue el Bosque Mesófilo de Montaña (BMM) con 481 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo más del doble de lo acumulado en el sistema policultivo tradicional - café con árboles de uso múltiple - PTR (188 Mg ha<sup>-1</sup>) o en el sistema especializado - monocultivo de café con árboles de Inga como sombra - ESP (133 Mg ha<sup>-1</sup>). Los valores del C en la biomasa aérea fueron muy superiores en el BMM, mientras que los contenidos de C orgánico en el suelo (COS) a una profundidad de 0 a 60 cm fueron de 117 Mg ha<sup>-1</sup>, 154 Mg ha<sup>-1</sup> y 128 Mg ha<sup>-1</sup> en ESP, PTR y BMM, respectivamente. El mayor porcentaje de COS con respecto al total de cada sistema se registró en los sistemas agroforestales, con 88 % en ESP y 82 % en el PTR, mientras que en el BMM fue de 27 %.

**Palabras clave:** carbono en biomasa aérea, carbono orgánico del suelo, ecuaciones alométricas

## Abstract

The effects of global warming are well known throughout the world. Carbon's (C) capture potential is significant in the agricultural and forestry sectors. Agroforestry systems have a strategic advantage in regards to the use of C, due to the potential content found in multiple plant species coexists simultaneously. The general object of the present study was the determination of carbon stock of the aerial stratum and soil in different land use system in Huatusco, Veracruz.. Results indicate that cloud forest (BMM) contains the largest contain of total C which was 481 Mg ha<sup>-1</sup> and that the agroforestry systems contained a smaller quantity of total C and traditional intercropping system -coffee with multiple use trees- PTR (188 Mg ha<sup>-1</sup>) and specialized system - monoculture coffee with shade tree of Inga- ESP (133 Mg ha<sup>-1</sup>). C values in the aerial biomass were higher in the BMM. The contents of soil organic carbon (SOC) at depth of 0 to 60 cm were 117 Mg ha<sup>-1</sup>, 154 Mg ha<sup>-1</sup> and 128 Mg ha<sup>-1</sup> in ESP, PTR and BMM, respectively. The largest percentage of SOC with regard to the total of each system was registered in the agroforestry systems with 88 % in ESP and 82 % in PTR, meanwhile BMM only had a 27% intake.

**key words:** aerial biomass carbon, soil organic carbon, allometric equations

## Introducción

El cambio climático, inducido en parte por diversas actividades humanas desarrolladas principalmente en países industrializados es un problema mundial, que afecta negativamente los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (IPCC, 2001). En la actualidad el cambio climático global se atribuye generalmente a un aumento de la temperatura global del planeta, debido a incrementos muy por encima de los niveles de tiempos preindustriales, de la concentración en la atmósfera de los llamados “gases de efecto invernadero” que son capaces de absorber la radiación infrarroja; estos gases son principalmente el

## Introduction

Climate change -partly caused by various human activities carried out mainly in industrialized countries- is a global problem that affects negatively the ecological, economic and social processes that rule the planet (IPCC, 2000). Currently climate change is attributed to an increase in global temperature, due to the increases -at levels vastly superior to those at preindustrial times- in the atmospheric concentration of greenhouse gases, which are capable of absorbing infrared radiation. These gases are mainly Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O)

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano o CH<sub>4</sub> (IPCC, 2007). Las emisiones de CO<sub>2</sub> por la actividad agrícola y forestal se calculan en sólo 5 % del total planetario, sin embargo, el potencial de almacenamiento de carbono (C) en el desarrollo de dichas actividades es muy significativo (Benites *et al.*, 1999). Nortcliff (2007) mencionó que el C orgánico del suelo (COS) almacenado en los primeros 100 cm es aproximadamente de 1500 a 1600 Pg (1 Peta gramo=1x10<sup>15</sup> g) y de 470 a 655 Pg de C en el estrato vegetal. La fijación de C implica que el CO<sub>2</sub> es capturado de la atmósfera y fijado en azúcares a través de la fotosíntesis por las plantas para almacenarlo como materia orgánica (MO) en sus raíces, hojarasca, troncos, frutos, etc. y a cambio devuelven oxígeno (O<sub>2</sub>) a la atmósfera. La descomposición paulatina de la MO debida a la muerte de estos seres vivos, aumenta la porción de C almacenado en el suelo (Seeberg-Elverfeldt, 2010).

El cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en México se encuentra en 12 estados, 56 regiones, 382 municipios y 4326 comunidades, donde se localizan más de 30 grupos indígenas (Martínez *et al.*, 2006b). Las regiones cafetaleras en México son ricas y diversas, de hecho tres de los estados productores más importantes, son aquellos que registran los más altos índices de biodiversidad (Moguel y Toledo, 1999). Por otro lado, el café es uno de los cultivos de mayor importan-

and methane (CH<sub>4</sub>) (IPCC, 2007). CO<sub>2</sub> emissions caused by agricultural and forestry activities are estimated to be only 5% of the planet's total however, carbon (C) storage potential in the execution of said activities is very significant (Benites *et al.*, 1999). Nortcliff (2007) said that soil organic carbon (COS) stored in the first 100 cm is approximately 1500 – 1600 Pg (1 Petagram = 1x10<sup>15</sup> g) and 470 – 655 Pg of C in the vegetal stratum. C fixation implies that the CO<sub>2</sub> is captured in the atmosphere and fixated into sugar through plants' photosynthesis to store it as organic matter (OM) in their roots, leaves, stem, fruits, etc. and instead return oxygen (O<sub>2</sub>) to the atmosphere. The gradual decomposition of the OM increases the amount of C stored in the soil (Seeberg-Elverfeldt, 2010).

Coffee (*Coffea arabica* L.) growing in Mexico can be found in 12 states, 56 regions, 382 municipalities and 4326 communities, where more than 30 indigenous groups are located (Martínez *et al.*, 2006b). Coffee regions in Mexico are rich and diverse, in fact three of the most important producing states are those where the highest biodiversity can be found biodiversity (Moguel y Toledo, 1999). On the other hand, coffee is one crop of the most economic, social, cultural and

cia económica, social, cultural y ambiental en México (Rosas *et al.*, 2008) y una actividad de gran relevancia para la población indígena y campesina que habita en las áreas montañosas (Anta, 2006). En la región de Huatusco, Veracruz, México, las alternativas para el manejo sostenible del cultivo de café son los sistemas agroforestales clasificados por Escamilla *et al.* (1994): sistema comercial, sistema de policultivo tradicional, sistema especializado, los cuales son los sistemas más comunes en la región dentro de sus dos modalidades: convencional y orgánico; ya que representan el tipo de cultivo con más aceptación social por parte de la mayoría de los productores y es más susceptible de mantener una producción sostenida de café orgánico. Como extremos de los sistemas de cultivo en la región de Huatusco, en general se encuentran, en cuanto al manejo convencional, el sistema ganadero (potrero) y el sistema a pleno sol, aunque éste se encuentra prácticamente inexistente en la región; en contraste, por el lado del manejo tradicional, se encuentra el sistema rústico, el cual es también muy poco representativo.

Los cafetales con sombra sostienen la productividad a través del tiempo utilizando menos insumos, lo que las hace más confiables cuando bajan los precios del café. Conservan la biodiversidad nativa cuando se conservan para el sombreado a taxones propios de la zona, así como la fertilidad; por otro lado evitan fenó-

environmental importance in Mexico (Rosas *et al.*, 2008); and an activity of great relevance for the indigenous and peasant populations that live in mountainous areas (Anta, 2006). In the Huatusco region, Veracruz, Mexico, the alternatives for a sustainable management of coffee crops are agroforestry systems classified by Escamilla *et al.* (1994): Commercial system, traditional polyculture system, specialized systems, which are the most usual systems in the region, with its two forms: conventional and organic, since they represent the type of cultivation with the most social acceptance by the majority of producers, and it's more capable of maintaining a sustained production of organic coffee. In regard to conventional management there is the rustic production system, which is not very representative.

Shaded coffee plantations maintain productivity through time using less inputs, this makes them more reliable for when coffee prices drop. They conserve native biodiversity when preserved for taxa shading typical of the area, they also conserve fertility; on the other hand they prevent phenomena such as soil erosion, water pollution. They increase grain size, improve the vigor and growth of coffee trees, modify the incidence of plagues and diseases, affect weed control, and

menos como la erosión del suelo, contaminación del agua; además se aumenta el tamaño de grano, mejora el vigor y crecimiento de los cafetos, modifica la incidencia de plagas y enfermedades, incide en el control de malezas, y se obtienen productos adicionales (Muschler, 2006). Otros estudios han confirmado que los cafetales sombreados ayudan a obtener mayor densidad de grano y mejora la calidad en taza. La sombra además amortigua los contrastes fuertes de temperatura, siendo más adecuado para el desarrollo del fruto (Martínez-Pérez, *et al.*, 2006a)

El objetivo principal de la presente investigación fue estimar el C almacenado por la biomasa aérea (arbórea, arbustiva, troncos caídos, herbácea y de mantillo) mediante ecuaciones alométricas y la determinación del COS a cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30, y 30-60 cm) en dos sistemas agroforestales de café: el Sistema Especializado (ESP) y el Policultivo Tradicional (PTR), para compararlo con un ecosistema natural, que a esa altitud es el Bosque Mesófilo de Montaña (BMM).

## **Materiales y Métodos**

### **Características del área de estudio**

El estudio se realizó durante 2011 en el Campo Experimental del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma

additional products are obtained (Muschler, 2006). Other studies have confirmed that shaded coffee plantation help to obtain a greater grain density and improves cup quality. Shade also softens the strong contrasts in temperature, which makes it more suitable for coffee fruit development (Martínez-Pérez, *et al.*, 2006a).

The main goal of this study was to estimate the C stored in the aerial biomass (trees, shrub, fallen trunks, herbaceous, and mulch) using allometric equation and COS determination at four depth levels (0 – 10, 10 – 20, 20 – 30, and 30 – 60 cm) in two coffee agroforestry systems: Specialized System (ESP) and Traditional Polyculture (PTR), to compare them with a natural ecosystem, which at this height is the Montane Cloud Forest (MCF).

## **Materials and Methods.**

### **Characteristics of the Study Area**

The study was carried out in 2011 at the Experimental Camp in the East Regional University Center (Centro Regional Universitario Oriente – CRUO) of the Chapingo Autonomous University (Universidad Autónoma Chapingo) located in Huatusco, Veracruz (Mexico), located between latitudes 19° 09' N and longitudes 96°

Chapingo ubicado en Huatusco, Veracruz (México), el cual se ubica a los 19° 09' de latitud Norte y los 96° 57' de longitud Oeste, a una altitud de 1334 m, con una precipitación promedio anual de 1700,17 mm. El clima que prevalece en el centro regional está representado por la fórmula climática (A)C(m)w''v(i')g; esto es: una transición entre los cálidos A y los templados C (Cisneros *et al.*, 1993) con una temperatura media anual de 17.2 °C. Los suelos, en general, son de origen volcánico (Pérez, 2004). El pH varía de 5.2 a 6.0 y las grandes pendientes varían de 3 a 60 % (Montiel y Robledo, 1998).

### Descripción de los tratamientos:

**Sistema especializado (ESP).** Es una modalidad en la que sólo se produce café bajo sombra no diversa que se caracteriza por utilizar principalmente árboles del género Inga. Se localiza entre los 19°10'26" N y 96°57'58"O a 1357 m de altitud, y su superficie fue de 0.5 hectárea (ha). La pendiente del terreno es de 51%. Antes del establecimiento de dicho sistema especializado hace 11 años, había un Bosque mesófilo de montaña nativo.

**Sistema policultivo tradicional (PTR).** Consiste en una plantación de café bajo sombra en cuya composición existe una gran diversidad de árboles nativos o de vegetación natural así como de *Persea schiedeana* Nees. (chinene), *Inga* spp. (Inga), y *Grevillea*

57' W, at an altitude of 1334 m, with annual average rainfall of 1700.17 mm. The climate prevalent at the regional center can be represented by the climate equation (A)C(m)w''v(i')g which means: A transition between warm A and mild C (Cisneros *et al.*, 1993) with an annual average temperature of 17.2 °C. Soils are generally of volcanic origin (Pérez, 2004). The pH varies from 5.2 to 6.0 and large slopes go from 3 to 60 % (Montiel y Robledo, 1998).

### Treatments Description:

**Specialized System (ESP).** It's a modality in which coffee is only produced under shade, it's characterized by using trees of the *Inga* genus. Located between 19°10'26" N and 96°57'58" W at 1357 m of altitude, and its area surface was 0.5 hectare (ha). The terrain's slope was 51%. Before the establishment of the specialized system eleven years ago, there was a montane cloud forest (MCF)

**Traditional Polyculture System (PTR).** Consists in a shaded coffee plantation comprised of a great variety of native trees or natural vegetation, including *Persea schiedeana* Nees. (chinene), *Inga* spp. (Inga), and *Grevillea robusta* A. Cunn. (grevillea). Before this system, there was a pasture

robusta A. Cunn. (grevillea). Antes del sistema de policultivo tradicional había un sistema de potrero con pastoreo de ganado bovino (hace 30 años). Este se localiza a 19°10'26" N y 96°58'04" O a 1320 m de altitud, y su superficie fue de 0.3 ha. La pendiente del terreno fue de 9%.

**Bosque mesófilo de montaña (BMM).** Estos bosques son uno de pocos los remanentes de este tipo de vegetación de la era Terciaria que conserva el país y puede describirse como un bosque de niebla tropical muy denso y con alto grado de endemismo florístico; dominado por especies de *Liquidambar straciflua* L. (ocozote), *Meliosma alba* (Schltdl.) Walp. (quiavis), *Persea* spp., (aguacatillo), *Solanum muricatum* Aiton. (hierba mora), *Chamaedorea tepejilote* Liebm. (tepejilote), numerosas orquídeas epifitas y helechos; también algunos de ellos de porte arborescente. Éste en concreto se localiza a 19°10'45" N y 96°58'03" O a 1284 m de altitud, y su superficie fue de 1.1 ha. La pendiente del terreno fue de 47% (Escamilla *et al.*, 1994).

### Muestreo de suelo y medición de biomasa

El diseño de las unidades de muestreo (UM) fue de tipo sistemático. Para fines estadísticos se colocaron tres UM en sentido Norte – Sur (UM 2, 3 y 4) y una en sentido Este – Oeste (UM 1) para cada sistema del estudio

system with grazing cattle (30 years ago). It's located between 19°10'26" N y 96°58'04" W at 1320 m of altitude, and its surface area was 0.3 ha. The terrain's slope was 9%.

### Montane Cloud Forest (MCF).

These forests are but few of the remaining of this type of vegetation from the Tertiary period still conserved in the country, and can be described as tropical forests of very dense fog with a high level of floristic endemism; dominated by species such as *Liquidambar straciflua* L. (ocozote), *Meliosma alba* (Schltdl.) Walp. (quiavis), *Persea* spp., *Solanum muricatum* Aiton., *Chamaedorea tepejilote* Liebm, various kinds of epiphyte orchidaceae and ferns. These forests are located between 19°10'45" N and 96°58'03" W at 1284 m of altitude, and its surface area was 1.1 ha. The terrain's slope was 47% (Escamilla *et al.*, 1994).

### Soil Sampling and Biomass Measuring

The design of the sampling units (SU) was of systematic type. For statistical purposes three SU were located in North-South direction (SU 2, 3, and 4) and one in East-West direction (SU 1) for each studied system (Figure 1). The SU were rectangular frames of 25 x 4 m (100 m<sup>2</sup>). To obtain

(Figura 1). Las UM fueron marcos rectangulares de 25 x 4 m ( $100 \text{ m}^2$ ). Para obtener el valor promedio de las UM se tomaron en cuenta los valores de los puntos N y S de cada una de las unidades (UM 2, 3 y 4) y de los puntos E y O de la UM 1, y así se obtuvieron muestras representativas de cada una de las UM que se utilizaron para calcular las características de la biomasa vegetal (arbustivo, herbácea y matillo) y del suelo (0-10, 10-20, 20-30, y 30-60 cm). Para la medición del C edáfico en los sistemas estudiados se colectaron muestras de dos pozos por UM. (Figura 2). Para determinar la densidad aparente ( $\rho_b$ ) del suelo se utilizó un tubo muestreador de PVC de 10 cm de largo y 5.5 cm de diámetro. El tubo se golpeó verticalmente con una tabla de madera y un martillo o maceta hasta penetrar totalmente en cada profundidad (Etchevers *et al.*, 2005; Rüginitz *et al.*, 2008).

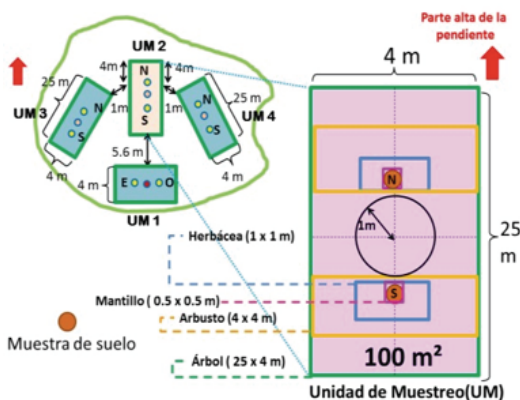


Figura 1. Esquemática de la unidad de muestreo (UM)

the average value from the SU were considered the values at points north and south for each units (SU 2, 3, and 4) and at points east and west for the SU 1, in this way were obtained representative samples from each SU which were used to calculate the characteristics of the plant biomass (shrubby, herbaceous and mulch) and of the soil at depths (0-10, 10-20, 20-30, and 30-60 cm). Samples from two well for each SU (Figure 2) were collected to measure soil carbon in the studied systems. A PVC sampling tube of 10 cm in length and 5.5 cm in diameter was used to determine the apparent density ( $\rho_b$ ) of soil. The tube was hit vertically with a wooden plank and a hammer or mace until penetrating at each depth (Etchevers *et al.*, 2005; Rüginitz *et al.*, 2008).

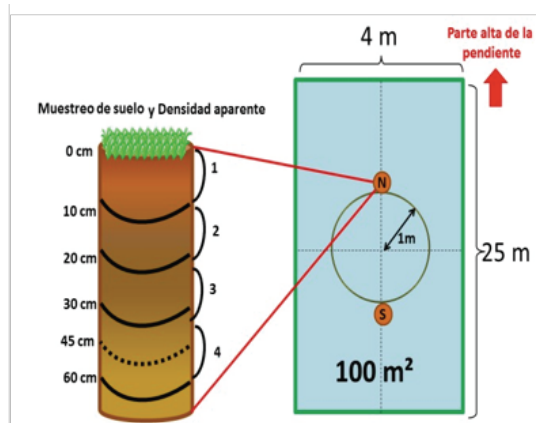


Figura 2. Esquema con las profundidades del muestreo de suelo utilizadas en el estudio de los sistemas.



La metodología seguida del presente trabajo corresponde a lo establecido por Rüginitz *et al.* (2008). Para determinar la biomasa vegetal total se utilizó la siguiente ecuación (1):

$$VT = (BA + Ba + BTC + BH + BM + BR) \quad (1)$$

Dónde: BVT = biomasa vegetal total ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BA = biomasa arbórea ( $Mg\ ha^{-1}$ ), Ba = biomasa arbustiva (incluye cafetos) ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BTC = biomasa de troncos caídos ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BH = biomasa herbácea ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BM = biomasa de mantillo ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BR = biomasa de raíces ( $Mg\ ha^{-1}$ ).

Para evaluar la Biomasa arbórea (BA) se utilizó todo el área disponible de la UM (25 x 4 m), considerando los árboles dentro de ella y cuyo diámetro a la altura del pecho ( $Dap = 1.30\ m$ ) fuera mayor de 5 cm. Para calcular la biomasa de los árboles en los sistemas agroforestales se utilizó la siguiente ecuación (Segura *et al.*, 2006) (2):

$$Y = -0.834 + 2.223 \times \log_{10}(D) \quad (2)$$

Dónde: Y =  $\log_{10}$  biomasa por encima del suelo en kilogramos (kg), D = Dap en centímetros (cm),  $\log_{10}$  = logaritmo en base 10.

Para calcular la biomasa de los árboles de Inga spp. por individuo en los sistemas agroforestales se utilizó la

The methodology followed in this study was established by Rüginitz *et al.* (2008). To determine total plant biomass the following equation was used (1):

$$VT = (BA + Ba + BTC + BH + BM + BR) \quad (1)$$

Where: BVT = total plant biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BA = tree biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ), Ba = shrub biomass (including coffee trees) ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BTC = fallen trunk biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BH = herbaceous biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BM = mulch biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ), BR = root biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ).

The entire area of the SU (25 x 4 m) was used to assess Tree biomass (BA) considering the trees within it whose diameter at breast height ( $Dbh = 1.30\ m$ ) was greater than 5 cm. To calculate tree biomass in the agroforestry systems the following equation was used (Segura *et al.*, 2006) (2):

$$Y = -0.834 + 2.223 \times \log_{10}(D) \quad (2)$$

Where: Y =  $\log_{10}$  above ground biomass in kilograms (kg), D = Dbh in centimeters (cm),  $\log_{10}$  = logarithm with base 10.

To calculate the biomass of Inga spp. trees by individuals in the agroforestry systems, the following equation was used (Segura *et al.*, 2006) (3):

siguiente ecuación (Segura *et al.*, 2006) (3):

$$Y = -0.889 + 2.317 \times \log_{10}(D) \quad (3)$$

Dónde: Y = log<sub>10</sub> biomasa arriba del suelo (kg), D = Dap (cm), log<sub>10</sub> = logaritmo en base 10. Para calcular la biomasa aérea del plátano por individuo se utilizó la siguiente ecuación (Van Noordwijk *et al.*, 2002) (4):

$$Y = 0.030 D^{2.13} \quad (4)$$

Dónde: Y = biomasa (kg), D = Dap (cm).

Para calcular la biomasa de los árboles en BMM se utilizó la siguiente ecuación (Brown, 1997; citado por Pearson *et al.*, 2005) (5):

$$Y = \exp(-2.289 + 2.649 \times \ln(D) - 0.021 \times (\ln D)^2) \quad (5)$$

Dónde: Y = biomasa arriba del suelo (kg), exp = exponente, ln = logaritmo natural, D = Dap (cm).

Por último para calcular la cantidad de biomasa por ha, se sumó la biomasa de todos los árboles medidos y registrados tanto en la parcela de 25 x 4 m (6).

$$BA = BT \times 0.1 \quad (6)$$

Dónde: BA = biomasa arbórea vegetal total (Mg ha<sup>-1</sup>), BT = biomasa total (Kg) en la UM de 25 x 4 m, 0.1 = factor de conversión en la UM de 25 x 4 m.

$$Y = -0.889 + 2.317 \times \log_{10}(D) \quad (3)$$

Where: Y = log<sub>10</sub> above ground biomass (kg), D = Dbh (cm), log<sub>10</sub> = logarithm with base 10. To calculate the aerial biomass of the plantain by individual, the following equation was used

(Van Noordwijk *et al.*, 2002) (4):

$$Y = 0.030 D^{2.13} \quad (4)$$

Where: Y = biomass (kg), D = Dbh (cm).

To calculate tree biomass in the MCF the following equation was used (Brown, 1997; quoted by Pearson *et al.*, 2005) (5):

$$Y = \exp(-2.289 + 2.649 \times \ln(D) - 0.021 \times (\ln D)^2) \quad (5)$$

Where: Y = above ground biomass (kg), exp = exponent, ln = natural logarithm, D = Dbh (cm).

Finally, to calculate the amount of biomass per ha, we added the biomass of each measured and recorded tree in the 25 x 4 m plot (6).

$$BA = BT \times 0.1 \quad (6)$$

Where: BA = total plant and tree biomass (Mg ha<sup>-1</sup>), BT = total biomass (Kg) in the 25 x 4 m SU, 0.1 = conversion factor in the 25 x 4 m SU.

Biomasa arbustiva, cafetos y otras especies de arbustos (Ba). Para la evaluación de vegetación arbustiva, se utilizaron cuadros de 4 x 4 m (16 m<sup>2</sup>), colocados en 1 m del centro de la UM. Luego se midió el diámetro de tallo por encima de 15 cm de suelo. Para calcular la biomasa aérea del café se utilizó la siguiente ecuación (Segura et al., 2006) (7):

$$Y = -1.113 + 1.578 \times \log_{10}(D) + 0.581 \times \log_{10}(H) \quad (7)$$

Dónde: Y = log<sub>10</sub> biomasa (kg), D = diámetro de tallo arriba de 15 cm de suelo (cm), H = altura (m), log<sub>10</sub> = logaritmo en base 10.

Luego, para calcular la cantidad de biomasa arbustiva por ha, se sumó la biomasa de todas las especies arbustivas (cafetos y otras especies) medidas (8).

$$Ba = BaSUM \times 625 \times 10^{-3} \quad (8)$$

Dónde: Ba = biomasa arbustiva vegetal total (Mg ha<sup>-1</sup>), BaSUM = biomasa total (kg) en la subunidad de muestreo (SUM) de 4 x 4 m, 625 × 10<sup>-3</sup> = factor de conversión en la SUM de 4 x 4 m.

Biomasa de troncos caídos (BTC). Para estimar la biomasa de troncos caídos > 5 cm de diámetro y > 50 cm de largo, el cálculo se realizó de la siguiente manera (Hairiah et al., 2001)

Shrub Biomass, Coffee Trees and Other Shrub Species (Ba). Squares with dimensions 4 x 4 m (16 m<sup>2</sup>) were used to assess the shrub vegetation, they were placed in 1 m at the center of the SU. Next, the diameter of the stem was measured at 15 cm above ground. To calculate the coffee's biomass the following equation was used (Segura et al., 2006) (7):

$$Y = -1.113 + 1.578 \times \log_{10}(D) + 0.581 \times \log_{10}(H) \quad (7)$$

Where: Y = log<sub>10</sub> biomass (kg), D = Stem diameter at 15 cm above ground (cm), H = height (m), log<sub>10</sub> = logarithm with base 10.

Afterwards, to calculate the amount of shrub biomass per ha, we added the measured biomass of all shrub species (coffee trees and other species) (8).

$$Ba = BaSUM \times 625 \times 10^{-3} \quad (8)$$

Where: Ba = Total shrub biomass (Mg ha<sup>-1</sup>), BaSUM = total biomass (kg) in the sub-sampling unit (SSU) of 4 x 4 m, 625 × 10<sup>-3</sup> = conversion factor in the 4 x 4 m SSU

Fallen Trunks Biomass (BTC). To estimate fallen trunks biomass > 5 cm in diameter and > 50 cm in length, the calculation was done as following (Hairiah et al., 2001) (9):

$$BAC = \pi r^2 \times L \times 0.43 \quad (9)$$

Dónde: BAC = biomasa de troncos caídos (g),  $\pi = \text{pi}$ , constante (3.1416),  $r = \text{radio (cm)}$ ,  $L = \text{longitud del tronco caído (cm)}$ ,  $0.43 = \text{densidad de tronco caído (g cm}^{-3}\text{)}$  (Pearson *et al.*, 2005).

Luego, para calcular la cantidad de biomasa por ha, se sumó la biomasa de todos los troncos caídos medidos (10).

$$BTC = BAC \times 10^{-4} \quad (10)$$

Dónde: BTC = biomasa de trocos caídos total (Mg ha<sup>-1</sup>), BAC = biomasa total (g) en la UM de 25 x 4 m,  $10^{-4} = \text{factor de conversión en la UM de 25 x 4 m}$ .

Biomasa herbácea (BH) y biomasa de mantillo (BM). Para evaluar la biomasa de la vegetación herbácea, se utilizó un marco de 1 x 1 m (1 m<sup>2</sup>), y un marco de 0.5 x 0.5 m (0.25 m<sup>2</sup>) para el mantillo. Las muestras fueron guardadas en bolsas plásticas para el transporte y después enviadas al laboratorio para el secado de las muestras en horno-estufa de aire forzado a 75°C, y se utilizó para determinar su peso seco una balanza de laboratorio. La biomasa herbácea se calculó con la fórmula (11):

$$BH = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0.01 \quad (11)$$

Dónde: BH = biomasa herbácea, materia seca (Mg ha<sup>-1</sup>), PSM = peso seco (g) de la muestra colectada, PFM = peso

$$BAC = \pi r^2 \times L \times 0.43 \quad (9)$$

Where: BAC = Fallen tree biomass (g),  $\pi = \text{pi}$ , constant (3.1416),  $r = \text{radius (cm)}$ ,  $L = \text{fallen trunk length (cm)}$ ,  $0.43 = \text{fallen trunk density (g cm}^{-3}\text{)}$  (Pearson *et al.*, 2005).

Then, to estimate biomass per ha, we added the biomass of all the measured fallen trunks (10).

$$BTC = BAC \times 10^{-4} \quad (10)$$

Where: BTC = total fallen trunks biomass (Mg ha<sup>-1</sup>), BAC = total biomass (g) in the 25 x 4 m SU,  $10^{-4} = \text{conversion factor in the 25 x 4 m SU}$ .

Herbaceous Biomass (BH) and Mulch Biomass (BM). A 1 x 1 m (1 m<sup>2</sup>) frame was used to assess the biomass of the herbaceous vegetation, and a 0.5 x 0.5 m (0.25 m<sup>2</sup>) frame for mulch. Samples were stored in plastic bags for transportation and later sent to the laboratory to dry the samples in a forced-air oven at 75°C, and a laboratory balance was used to determine its dry weight. Herbaceous biomass was calculated using the following equation (11):

$$BH = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0.01 \quad (11)$$

Where: BH = Herbaceous biomass, dry matter (Mg ha<sup>-1</sup>), PSM = collected sample's dry weight (g, PFM = collec-

fresco (g) de la muestra colectada, PFT = peso fresco total (g) por metro cuadrado, 0.01 = factor de conversión. Así mismo, para la biomasa de mantillo fue empleada la misma ecuación usando 0.04 como factor de conversión. (12):

$$BM = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0.04 \quad (12)$$

Biomasa de raíces (BR). Para estimar la biomasa de raíces, en este cálculo se aplicó la siguiente ecuación: (Cairns *et al.*, 1997; IPCC, 2003) (13):

$$BR = \exp[-1.0587 + 0.8836 \times \ln(BAE)] \quad (13)$$

Dónde: BR = biomasa de raíces, materia seca ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ), exp = exponente, ln = logaritmo natural, BAE = biomasa arbórea, arbustiva y herbácea, materia seca ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ).

Carbono en la biomasa vegetal total (CVT). Para estimar la cantidad de C en la biomasa vegetal total (CVT) se utilizó la siguiente fórmula (14):

$$CBV = BVT \times 0.5 \quad (14)$$

Dónde: CBV = carbono en la biomasa vegetal total ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ), BVT = biomasa vegetal total ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ), 0.5 = constante.

ted sample's fresh weight (g), PFT = Total fresh weight (g) per meter squared, 0.01 = conversion factor.

Similarly, to calculate mulch biomass the same equation was used, but this time with 0.04 as conversion factor. (12):

$$BM = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0.04 \quad (12)$$

Root Biomass (BR). To estimate root biomass the following equation was used: (Cairns *et al.*, 1997; IPCC, 2003) (13):

$$BR = \exp [-1.0587 + 0.8836 \times \ln(BAE)] \quad (13)$$

Where: BR = root biomass, dry matter ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ), exp = exponent, ln = natural logarithm, BAE = tree, herbaceous, and shrub biomass, dry matter ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ).

Total Plant Biomass Carbon (CVT). To estimate the amount of carbon within the total plant biomass (CVT) the following equation was used (14):

$$CBV = BVT \times 0.5 \quad (14)$$

Where: CBV = total plant biomass carbon ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ), BVT = total plant biomass ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ), 0.5 = constant.

## Cálculo del carbono en el suelo (COS).

Para la determinación del carbono edáfico, las muestras de suelo se homogeneizaron en el interior de su propia bolsa destruyendo manualmente todos los terrones y se colocaron en charolas de aluminio para determinar su peso seco al aire. La muestra secada al aire se pasó por un tamiz de 2 mm, para separar la grava, los restos vegetales y animales (Etchevers *et al.*, 2005).

El análisis de porcentaje de COS se midió por el método de Walkley and Black (1934). La cantidad de C almacenado en el suelo se determinó con la siguiente ecuación (Etchevers *et al.*, 2005) (19):

$$\text{COS} = \text{CC} \times \text{qb} \times \text{P} \quad (19)$$

Dónde: COS = carbono orgánico en el suelo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), CC = contenido de carbono (%), qb = densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ), P = profundidad de muestreo (cm).

Densidad aparente del suelo (qb). Para determinar la qb del suelo se utilizó la siguiente fórmula (15):

$$\rho_b = \frac{\text{Peso seco del suelo} - (\text{Peso de raíces} + \text{Peso de piedras} + \text{Peso de residuos})}{\text{Volumen del cilindro de muestreo} - (V_r + V_p + V_{re})} \quad (15)$$

## Soil Carbon Calculation (COS).

To determine soil carbon, soil samples were homogenized inside their bags and all clods were manually destroyed, they were then placed in aluminum trays to determine their dry weight. The dried sampled was then passed through a 2 mm sieve, to separate the gravel and plant and animal remains (Etchevers *et al.*, 2005).

The COS percentage analysis was measured using Walkley and Black's (1934) method. The amount of carbon stored in soil was determined using the following equation (Etchevers *et al.*, 2005) (19):

$$\text{COS} = \text{CC} \times \text{qb} \times \text{P} \quad (19)$$

Where: COS = Soil organic carbon ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), CC = carbon content (%), qb = apparent density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), P = sampling depth (cm).

Apparent Density of Soil (qb). To determine the qb of soil the following equation was used (15):

Dónde:  $\rho_b$  = densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ), Volumen del cilindro de muestreo =  $\pi r^2h$ ,  $r$  = radio del cilindro (cm),  $h$  = altura del cilindro (cm),  $V_r$  = volumen de las raíces en centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ ),  $V_p$  = volumen de las piedras ( $\text{cm}^3$ ),  $V_{re}$  = volumen de los residuos ( $\text{cm}^3$ ).

Se calculó el volumen de las raíces ( $V_r$ ), el volumen de las piedras ( $V_p$ ) y el volumen de los residuos ( $V_{re}$ ) con la siguiente fórmula (Etchevers *et al.*, 2005) (16,17 y 18):

$$V_r = \text{peso seco de las raíces en gramos} / 0.3 \text{ (g cm}^3\text{)} \quad (16)$$

$$V_p = \text{peso seco de las piedras en gramos} / 2.4 \text{ (g cm}^3\text{)} \quad (17)$$

$$V_{re} = \text{peso seco de los residuos en gramos} / 0.3 \text{ (g cm}^3\text{)} \quad (18)$$

Dónde:  $0.3 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$  = densidad media de las raíces y los residuos,  $2.4 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$  = densidad real media de las piedras.

Cálculo del carbono total (CT). Para determinar el CT almacenado en las diferentes UM, se utilizó la siguiente fórmula (20):

$$CT = CBV + COS \quad (20)$$

Donde: CT = carbono total de la UM ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), CBV = carbono en la biomasa vegetal total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), COS = carbono orgánico en el suelo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

Where:  $\rho_b$  = apparent density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), Sampling cylinder volume =  $\pi r^2h$ ,  $r$  = cylinder radius (cm),  $h$  = cylinder height (cm),  $V_r$  = root volume in centimeters squared ( $\text{cm}^3$ ),  $V_p$  = stones volume ( $\text{cm}^3$ ),  $V_{re}$  = waste volume ( $\text{cm}^3$ ).

Root volume ( $V_r$ ), Stone volume ( $V_p$ ) and waste volume ( $V_{re}$ ) were calculated with the following equation (Etchevers *et al.*, 2005) (16,17 and 18):

$$V_r = \text{Root dry weight in grams} / 0.3 \text{ (g cm}^3\text{)} \quad (16)$$

$$V_p = \text{Stones dry weight in grams} / 2.4 \text{ (g cm}^3\text{)} \quad (17)$$

$$V_{re} = \text{Waste dry weight in grams} / 0.3 \text{ (g cm}^3\text{)} \quad (18)$$

Where:  $0.3 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$  = average density of roots and waste,  $2.4 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$  = stone average real density.

Total Carbon Calculation (CT). To determine CT stored in different SU, the following equation was used (20):

$$CT = CBV + COS \quad (20)$$

Where: CT = total carbon in the SU ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), CBV = carbon within the total plant biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), COS = organic carbon in soil ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

## Resultados y discusión

Carbono almacenado en los árboles. La máxima cantidad de C almacenado en los árboles se encuentra en el BMM, con una cantidad 293.9 Mg ha<sup>-1</sup>. Este resultado puede adjudicarse a la mayor densidad de árboles y a una mayor diversidad de especies. El BMM contó con un mayor número de árboles (1125 por ha), esta cantidad fue aproximadamente 10 veces mayor a la de los sistemas agroforestales evaluados (125 por ha). El sistema agroforestal con el PTR (20.9 Mg ha<sup>-1</sup>) registró mayor contenido de C comparado con el sistema ESP (5.3 Mg ha<sup>-1</sup>). Ambos sistemas contaron con la misma densidad de árboles (125 por ha); sin embargo, PTR presentó tres especies arbóreas: *Persea schiedeana* (Chinene), *Inga* spp. (*Inga*), and *Grevillea robusta* (*Grevillea*), las cuales registraron una gran cantidad de C almacenado.

Carbono almacenado en los arbustos (Cafetos). Con respecto a la cantidad de C en los arbustos de los sistemas agroforestales, hubo una diferencia ligeramente superior al C del sistema ESP (2.8 Mg ha<sup>-1</sup>), aunque desde el punto de vista estadístico no fue significativa. En el PTR el contenido de C fue de 1.7 Mg ha<sup>-1</sup>. La diferencia entre los dos sistemas fue la densidad por ha, 2281 cafetos en el sistema ESP y 1406 cafetos en el PTR. La cantidad de contenido de C en los

## Results and discussion

Carbon Stored in Trees. The maximum amount of C stored in trees is found in the MCF, with 293.9 Mg ha<sup>-1</sup>. This result can be attributed to the greater tree density and species biodiversity. The MCF had a larger number of trees (1125 per ha), about 10 times greater than the assessed agroforestry systems (125 per ha). The agroforestry system of PTR (20.9 Mg ha<sup>-1</sup>) recorded more C content than the ESP system (5.3 Mg ha<sup>-1</sup>). Both systems had the same tree density (125 per ha), however, PTR presented three tree species: *Persea schiedeana* (*Chinene*), *Inga* spp. (*Inga*), and *Grevillea robusta* (*Grevillea*), which recorded a large quantity of stored C.

Carbon Stored in Shrubs (Coffee Trees). In respect to C stored in shrubs in the agroforestry systems, it was slightly higher than C in the ESP system (2.8 Mg ha<sup>-1</sup>), although from a statistical point of view it wasn't significant. In PTR the C content was 1.7 Mg ha<sup>-1</sup>. The difference between both systems was density/ha, 2281 coffee tree in the ESP system and 1406 coffee trees in the PTR system. The C content in shrubs of the MCF (1.5 Mg ha<sup>-1</sup>) was less than the agroforestry systems. Shrub condition in the MCF was the high density, however, stem diameter



arbustos del BMM ( $1.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) fue menor que el de los sistemas agroforestales. La condición de los arbustos en el BMM fue la gran densidad, sin embargo, el diámetro del tallo resultó menor.

Carbono almacenado en troncos caídos. El sistema ESP registró menor cantidad de C almacenado de  $0.02 \text{ Mg ha}^{-1}$ . En el caso de PTR y BMM se registraron  $0.19 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $3.95 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente. El número de los troncos caídos por ha fue igual (150) en el PTR y en el BMM. Sin embargo, el tamaño del tronco en cuanto a diámetro promedio y largo del tallo en BMM se registró aproximadamente dos veces más grueso y tres veces más largo que en el PTR.

Carbono almacenado en herbáceas y mantillo. El PTR presentó la mayor cantidad de C en el estrato herbáceo con  $0.76 \text{ Mg ha}^{-1}$ , que fue significativamente diferente de los otros dos sistemas. En el sistema ESP se presentó muy poca cantidad de biomasa herbácea ( $0.02 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). El BMM tuvo un valor mayor ( $0.14 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) que el sistema ESP. En el caso del contenido de C del estrato del mantillo no existió diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos. El contenido de C en el mantillo fue  $5.55 \text{ Mg ha}^{-1}$  (ESP),  $4.53 \text{ Mg ha}^{-1}$  (PTR) y  $5.47 \text{ Mg ha}^{-1}$  (BMM). Se

was smaller.

Carbon Stored in Fallen Trunks. ESP system recorded less amount of stored C at  $0.02 \text{ Mg ha}^{-1}$ . In the case of PTR and MCF  $0.19 \text{ Mg ha}^{-1}$  and  $3.95 \text{ Mg ha}^{-1}$  were recorded, respectively. The number of fallen trunks per ha (150) was the same both in the PTR as in the MCF. However, trunk size, regarding average diameter and length in the MCF was found to be about twice thicker and three times longer than the PTR.

Carbon Stored in Herbaceous Plants and Mulch. PTR presented the highest C content in the herbaceous stratum with  $0.76 \text{ Mg ha}^{-1}$ , significantly different from the two other systems. The ESP system showed little herbaceous biomass ( $0.02 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). The MCF presented a higher value ( $0.14 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) than the ESP system. Regarding C content at the mulch stratum, no significant differences were found between treatments. C content in mulch was  $5.55 \text{ Mg ha}^{-1}$  (ESP),  $4.53 \text{ Mg ha}^{-1}$  (PTR) and  $5.47 \text{ Mg ha}^{-1}$  (MCF). Mulch was found in the agroforestry systems because sampling was carried out during harvest time. Furthermore, there was less tree density in the ESP system. These conditions reduce the decomposition speed of fallen leaves. However, a part of mulch in the MCF was in an

encontró mantillo en los sistemas agroforestales debido a que el muestreo se realizó en la época de cosecha de café. Además hubo menor densidad de árboles en el sistema ESP. Las condiciones anteriores disminuyen la velocidad de la descomposición de la hojarasca. En cambio, una parte del mantillo en el BMM estuvo en un avanzado grado de descomposición. El caso de la descomposición alta de mantillo podría explicarse por la densidad y diversidad de árboles.

Carbono almacenado en las raíces. La cantidad de raíces varía proporcionalmente con la cantidad de biomasa arbórea. La mayor cantidad de C se encontró en el BMM (48.15 Mg ha<sup>-1</sup>), ya que en este sistema se registró la máxima cantidad de árboles. En los otros dos sistemas agroforestales; ESP (1.96 Mg ha<sup>-1</sup>) y PTR (4.97 Mg ha<sup>-1</sup>) no existió diferencia estadísticamente significativa.

Contenido de carbono en el suelo. El PTR fue en el que se obtuvo la mayor cantidad de C (154.3 Mg ha<sup>-1</sup>), seguido del BMM (128.2 Mg ha<sup>-1</sup>), y en el sistema ESP fue donde se encontró la menor cantidad (117.1 Mg ha<sup>-1</sup>). En la primera capa de suelo (0-10 cm) se registró la mayor concentración de C, de aproximadamente 25% del total en los sistemas (Tabla 1). El factor que ayuda a determinar la cantidad de C en el suelo es el historial del sistema, en cuanto al cambio de uso de suelo. Tomando en cuenta que el sistema ESP

advanced state of decomposition, this could be explained by the density and variety of trees in the area.

**Carbon Stored in Roots.** Root quantity varies proportionally with the amount of tree biomass. The largest amount of C was found in the MCF (48.15 Mg ha<sup>-1</sup>) because most trees were recorded in this system. In the other two agroforestry systems ESP (1.96 Mg ha<sup>-1</sup>) and PTR (4.97 Mg ha<sup>-1</sup>) there were no statistically significant differences.

**Soil Carbon Content.** PTR presented the most C (154.3 Mg ha<sup>-1</sup>), followed by the MCF (128.2 Mg ha<sup>-1</sup>), and in the ESP system was found the least amount (117.1 Mg ha<sup>-1</sup>). The largest C concentration -approximately 25% of the systems' total- was recorded in the first soil layer (0 – 10 cm) (Table 1). The factor that helps to determine the amount of C in soil is the system's history in relation to changes in its use.

Considering that the ESP system was a forest in the year 2000, the accumulated C during that period must be taken into account. On the other hand, considerable levels of OM have been added to the PTR since the last 30 years, contrary to chemical

era bosque en el año 2000 se debe considerar el C acumulado durante esa época. Por otra parte, al PTR se le han estado agregando cantidades considerables de MO desde los últimos treinta años, que a diferencia de los tratamientos con fertilizantes químicos, se indujo a la acumulación de C en el suelo, cuando años atrás era potrero.

fertilizer treatments, this has led to the accumulation of C in soil, when years ago it was a paddock.

Tabla 1. Contenido promedio de carbono orgánico en el suelo (COS) a diferentes profundidades del lugar del estudio.

Profundidad (cm)	Sistema Especializado (ESP)	Policultivo Tradicional (PTR)	Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)
	Contenido de C (Mg ha <sup>-1</sup> )		
0-10	31.6 ± 3.03	38.4 ± 1.72	36.0 ± 0.22
10-20	22.7 ± 5.01	30.3 ± 0.84	25.1 ± 0.26
20-30	18.2 ± 5.65	26.5 ± 0.50	19.7 ± 1.96
30-60	44.5 ± 11.58	59.2 ± 9.04	47.4 ± 10.93
0-60	117.1 ± 23.92 a*	154.3 ± 9.74 a	128.2 ± 12.84 a
N	8	8	8

\*Letras iguales indican diferencias no significativas entre sistemas por estrato ( $p < 0.05$ ).

### Distribución del contenido de carbono por componentes del sistema

En el sistema ESP, el componente que constituyó la mayor proporción de C almacenado fue el suelo (0-60 cm de profundidad) que sumó el 88% (117.1 Mg ha<sup>-1</sup>) del total, seguido por el C asociado al mantillo y a los árboles. Los contenidos de C tuvieron valores similares: 5.55 Mg ha<sup>-1</sup>(4%) y 5.28 Mg ha<sup>-1</sup> (4%), en mantillo y en árboles respectivamente. La menor cantidad de C se registró en los troncos caídos y en el estrato herbáceo (Tabla 2).

### Carbon content distribution by system component.

In the ESP system, the component with the largest proportion of C stored was soil (0-60 cm depth), which added 88% (117.1 Mg ha<sup>-1</sup>) regarding the total carbon content, followed by the C associated with litter and trees.

Carbon content had similar values: 5.55 Mg ha<sup>-1</sup> (4%) and 5.28 Ha<sup>-1</sup> mg (4%), litter and trees respectively. The least amount C was recorded on fallen logs and in the herbaceous layer (Table 2).

Tabla 2. Distribución del contenido promedio de carbono en cada uno de los componentes de los sistemas estudiados.

Estrato	Café Especializado (ESP)		Café en Policultivo Tradicional (PTR)		Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	
	C (Mg ha <sup>-1</sup> )	(%)	C (Mg ha <sup>-1</sup> )	(%)	C (Mg ha <sup>-1</sup> )	(%)
Arbóreo	5.28 <sup>b*</sup>	4	20.9 <sup>b</sup>	11	293.93 <sup>a</sup>	61
Arbustivo	2.76 <sup>a</sup>	2	1.67 <sup>a</sup>	0.9	1.52 <sup>a</sup>	0.3
Troncos caídos	0.02 <sup>a</sup>	0.02	0.2 <sup>a</sup>	0.1	3.95 <sup>a</sup>	0.8
Herbáceo	0.02 <sup>b</sup>	0.02	0.76 <sup>a</sup>	0.4	0.14 <sup>a</sup>	0.03
Mantillo	5.55 <sup>a</sup>	4	4.53 <sup>a</sup>	2	5.47 <sup>a</sup>	1.1
Raíz	2.02 <sup>b</sup>	2	5.17 <sup>b</sup>	3	48.15 <sup>a</sup>	10
Suelo**	117.1 <sup>a</sup>	88	154.3 <sup>a</sup>	82	128.2 <sup>a</sup>	27
<b>Total</b>	<b>132.7<sup>b</sup></b>	<b>100</b>	<b>187.6<sup>b</sup></b>	<b>100</b>	<b>481.4<sup>a</sup></b>	<b>100</b>

\* Same letters indicate no significant differences between systems by stratum ( $p < 0.05$ )

\*\*Depth of 0 – 60 cm.

En el PTR, el componente que reportó el mayor contenido de C también fue el suelo (0-60 cm de profundidad) con el 82% (154.3 Mg ha<sup>-1</sup>) del total, seguido de los árboles (20.9 Mg ha<sup>-1</sup>, 11%). El contenido de C asociado a la raíz y al mantillo fueron similares en ambos componentes, aproximadamente un 3% del total: 5.17 Mg ha<sup>-1</sup> y 4.53 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente. Los menores valores del C asociados en este sistema fueron los registrados en los troncos caídos (0.19 Mg ha<sup>-1</sup>, 0.1%).

En cuanto a toda la biomasa aérea, de nuevo el bosque nativo sobresale de los dos sistemas agroforestales con un contenido de C de 305 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que PTR y ESP tuvieron 28 Mg ha<sup>-1</sup> y 14 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A diferencia de los

In the PTR the component that presented the most C content was also soil (0-60 cm depth) with 82% (154.3 Mg ha<sup>-1</sup>) of the total, followed by trees (20.9 Mg ha<sup>-1</sup>, 11%). C content related to roots and mulch was similar in both components, approximately 3% of the total: 5.17 Mg ha<sup>-1</sup> and 4.53 Mg ha<sup>-1</sup> respectively. The lowest C figures in this system were recorded in fallen trunks (0.19 Mg ha<sup>-1</sup>, 0.1%).

With respect to the aerial biomass, the native forest again stands out from the two agroforestry systems with a C content of 305 Mg ha<sup>-1</sup>, while the PTR and ESP presented 28 Mg ha<sup>-1</sup> and 14 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. Unlike the other

otros sistemas, la mayor cantidad del C almacenado en BMM se debió principalmente al componente arbóreo (61%), seguido del componente suelo y de las raíces (27% y 10%, respectivamente). La menor cantidad del C almacenado fue la del componente herbáceo.

Un comportamiento similar de la distribución del C se observó en un sistema agroforestal de café en Nicaragua (Suárez, 2002), donde el suelo (0-50 cm) resultó ser la fuente con mayor potencial de C almacenado, que fue aportado en un 90% (por el ESP) y un 89% (por el PTR) al C total. Los valores del C total en la biomasa aérea en el sistema ESP de 14 Mg ha<sup>-1</sup> y 305 Mg ha<sup>-1</sup> para el BMM fueron inferiores a los reportados por Lapeyre *et al.* (2004), con 19 Mg ha<sup>-1</sup> (el sistema Especializado) y 485 Mg ha<sup>-1</sup> (bosque mesófilo de montaña) en Perú. El C total almacenado en los sistemas agroforestales en un estudio llevado a cabo en Chiapas, México varía de 213.8 Mg ha<sup>-1</sup> en ESP a 167.4 Mg ha<sup>-1</sup> en PTR en una profundidad de 0-30 cm (Soto-Pinto *et al.*, 2009). En Costa Rica, Ávila *et al.* (2001) encontraron 164.3 Mg ha<sup>-1</sup> de C total en monocultivo y 195 Mg ha<sup>-1</sup> en policultivo (0-25 cm de profundidad) sin raíz, lo que se traduce en más del 89% de C almacenado en el suelo en sistemas agroforestales. En Oaxaca, México, Etchevers *et al.* (2001) reportaron 152 Mg ha<sup>-1</sup> de COS en el sistema especializado (0-105 cm de

systems, most of the C stored in the MCF was due to the tree component (61%), followed by soil and root components (27% y 10%, respectively). The herbaceous component store the least amount of C.

A similar behavior was found in the C distribution observed in a coffee agroforestry system in Nicaragua (Suárez, 2002), where soil (0-50 cm) ended up storing most of the C, providing (by ESP) and 89% (by PTR) to the total C. Total C values in the aerial biomass in the ESP system of 14 Mg ha<sup>-1</sup> and 305 Mg ha<sup>-1</sup> for the MCF were lower than those reported by Lapeyre *et al.* (2004), with 19 Mg ha<sup>-1</sup> (Specialized System) and 485 Mg ha<sup>-1</sup> (montane cloud forest) in Peru. The total stored C in agroforestry systems, according to a study carried out in Chiapas, varies from 213.8 Mg ha<sup>-1</sup> in the ESP a 167.4 Mg ha<sup>-1</sup> in the PTR at a depth of 0 – 30 cm (Soto-Pinto *et al.*, 2009). In Costa Rica Ávila *et al.* (2001) found a total of 164.3 Mg ha<sup>-1</sup> of C in monoculture and 195 Mg ha<sup>-1</sup> in rootless polyculture (0-25 cm depth), resulting in more than 89% of the stored C in soil in agroforestry systems. In Oaxaca, México, Etchevers *et al.* (2001) reported 152

profundidad).

Los valores para el BMM encontrados en el presente estudio se asemejan a lo reportado por Masera *et al.* (2001), Ordóñez (2004) e INE-SEMARNAT (2005), citados por Vega-López (2009), en bosque de neblina; estos autores estimaron un contenido de C total de 430 Mg ha<sup>-1</sup> en México (aunque no mencionan en que parte del país). Por otra parte Etchevers *et al.* (2001) reportaron un valor de 255 Mg ha<sup>-1</sup> en un bosque mesófilo de Oaxaca (0-105 cm de profundidad), que es un valor inferior a los resultados de este estudio (Tabla 2).

## Conclusiones

Para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se necesita una transformación tanto de nuestras fuentes y usos de la energía, como de la forma en que se practica la agricultura y los usos de la tierra. Los sistemas agroforestales son técnica, social y económicamente viables (De Jong *et al.*, 1997) y su potencial para el almacenamiento del C varía dependiendo del tipo de sistema, la composición de especies, su arreglo topológico, la edad, la ubicación geográfica y los factores ambientales (Jose, 2009).

Como en gran parte de los estudios precedentes la mayor cantidad significativa de CT se encontró en el BMM (61%) superando claramente a los dos sistemas agroforestales ESP

Mg ha<sup>-1</sup> soil organic carbon COS in the specialized system (0-105 cm depth).

Values for the MFC in this study agree with that reported by Masera *et al.* (2001), Ordóñez (2004) and INE-SEMARNAT (2005), quoted by Vega-López (2009), in the cloud forest, these authors estimated a total C content of 430 Mg ha<sup>-1</sup> in México (although which part of the country is not mentioned). On the other hand Etchevers *et al.* (2001) reported a value of 255 Mg ha<sup>-1</sup> in a cloud forest in Oaxaca (0-105 cm depth), which is a lower value than the results is obtained in from this study (Tabla 2).

## Conclusions

To reduce CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere, a transformation of energy sources and uses is needed, such as the agricultural practice and land uses. Agroforestry systems are technically, socially and economically viable (De Jong *et al.*, 1997) and their C storage potential varies depending on the type of system, species composition, topological arrangement, age, geographic location and environmental factors (Jose, 2009).

(4%) y PTR (11%) con los que se comparó; esto fue debido a que fue el sistema en el que se registró la mayor concentración de biomasa arbórea (Tabla 2).

En lo que respecta al contenido de COS, se encontró que no hubo diferencia estadísticamente significativa entre los sistemas agroforestales y el BMM. Sin embargo, la mayor cantidad de COS se registró principalmente en la capa superficial de 0 a 10 cm de los sistemas agroforestales, con un 88% en el sistema ESP y 82% en el PTR, y 27% en el BMM, disminuyendo gradualmente en todos los casos a medida que aumentó la profundidad de muestreo.

Este servicio ambiental como almacén de C adicional a la producción de alimentos que aportan los sistemas agroforestales en las regiones tropicales, debido a que en gran parte se establece y depende de las comunidades locales, debe ser estimulado y favorecido por las autoridades estatales y a su vez, debe ser considerado por los organismos internacionales involucrados como una actividad mitigadora del cambio climático. Dada la constante extensión a nivel mundial de las tierras de cultivo o destinadas a la ganadería en detrimento de los ecosistemas naturales, sumados a la presión a la que están siendo sometidos los cafetales del área para transformarlos en potreros (Ávila y Zamora, 2010) nos recuerda que dichos sistemas producti-

As in the previous studies, the most significant amount of CT was found in the MCF (61%) clearly surpassing both agroforestry systems ESP (4%) and PTR (11%) to which it was compared to; because the highest concentration of tree biomass was recorded in this system (Table 2).

Regarding COS content, it was found that there were no statistically significant differences between agroforestry systems and the MCF. However, most COS was recorded in the topsoil (0 – 10 cm) of agroforestry systems, with 88% in the ESP and 82% in the PTR, and 27% in the MCF, gradually decreasing in all cases as the sampling depth increased.

This environmental service, as additional C storage for food production, provided by agroforestry systems in tropical regions must be encouraged by state authorities and at the same time it must be considered -by the related international organizations- as an activity to reduce climate change. Given the constant expansion of global farmlands and livestock at the expense of natural ecosystems, plus the pressure coffee plantation are undergoing to transform them into paddocks (Ávila and Zamora, 2010)

vos mitigadores del cambio climático, se hallan en serio peligro. La información obtenida en este trabajo indica que este servicio ambiental adicional a la producción de alimentos, saca a la luz el potencial de estos sistemas agroforestales como base para el almacenamiento de C, principalmente en el componente edáfico del sistema, convirtiendo a esta alternativa en una forma de minimizar los efectos de la agricultura local sobre un cambio climático que, sin embargo, afecta de manera global.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación y Postgrado (DGIP) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), y al Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) por el apoyo económico y logístico de la presente investigación, así como a la Secretaría Relaciones Exteriores (SRE) por la beca otorgada a la primera autora.

reminds us that these productive systems are in grave danger. The information obtained in this study shows that this service, additional to food production, brings to light these systems' potential for C storage, mainly in the soil component. Thus becoming an alternative way to mitigate the effects of local agriculture in climate change, which has global repercussions.

### **Acknowledgements**

The authors acknowledge the Dirección General de Investigación y Postgrado (DGIP) of the Universidad Autónoma Chapingo (UACH), and the Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) for the financial and logistical support in this study, and also to the Secretaría Relaciones Exteriores (SRE) for the scholarship given to the first author.



**Literatura Citada**

- Anta F., S. 2006. El café de sombra: un ejemplo de pago de servicios ambientales para proteger la biodiversidad. México. Gaceta ecológica 80: 19-31.
- Ávila, G., Jiménez F., Beer J., Gómez M., Ibrahim M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas 8 (30): 32-35.
- Ávila, C. y Zamora P. 2010. Producción de hojarasca y materia orgánica en agroecosistemas cafetaleros marginales de Ocotlán Chico, Veracruz, México. Polibotánica 30: 69-87.
- Benites, J., Dudal R., Koohafkan P. 1999. Land, the platform for local food security and global environmental protection. In: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin American and the Caribbean. Proceedings of the IFAD/FAO expert consultation. Roma, Italy. pp: 37-42.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Forestry Paper 134. Roma, Italy. 55 p.
- Cairns M., Brown A., S., Helmer E.H., Baumgardner G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia 111: 1- 11.
- Cisneros S., Martínez P., Díaz C., Torres R., Guadarrama Z. y Cruz L. 1993. Clima. In: Caracterización de la agricultura de la zona centro de Veracruz. Centro Regional Universitario Oriente (CRUO). Universidad Autónoma Chapingo. Veracruz, México. pp: 15-20.
- De Jong, B., R. Tipper y J. Taylor. 1997. A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, Mexico. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2: 231-246.
- Escamilla P., E., A.L. Licóna V, S. Díaz C, H.V. Santoyo C, R. Sosa y L. Rodríguez R. 1994. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México; un análisis tecnológico. Revista de Historia 30: 41-67.
- Etchevers, J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los

- stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In: Simposio Internacional y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. 19 p.
- Etchevers, J. D., C. M. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla y R. M. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 p.
- Hairiah, K., S.M. Sitompul, M. Van Noordwijk and C. Palm. 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Bogor, Indonesia. 32 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2001. Cambio Climático 2001. Impactos, adaptación vulnerabilidad. Tercer Informe de Evaluación. 95 p. [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/vol4/spanish/pdf/wg2sum.pdf](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/pdf/wg2sum.pdf).
- IPCC (Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA. 996 p.
- Jose, S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefit: an overview. *Agroforest Systems* 76:1-10.
- Lapeyre, T., J. Alegre y L. Arévalo. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 3(1,2):35-44.
- Martínez-Pérez, D.; E. Pérez-Portilla y J. G. Partida-Sedas. 2006a. Los perfiles de sabor del café en el estado de Veracruz. En: INIFAP, CP, UACH y ITUG, ITBOCA, UNAM 2006. Avances en la investigación agrícola, pecuaria, forestal y acuícola en el trópico mexicano. Libro científico número 3, Veracruz, México. pp. 211-221.
- Martínez, P., D.; E. Pérez P.; J. G. Partida S y P. Läderach. 2006b. Algunos impactos

- de los efectos abióticos, bióticos y de proceso industrial sobre características relacionadas con la calidad del café en Veracruz, México. En: Pohlan J.; L. Soto y J. Barrera (Ed.). *El cafetal del futuro; realidades y visiones*. Shaker Verlag, Aachen, Alemania, pp. 177-188.
- Moguel P. y V. M. Toledo. 1999. El café en México; ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *El Jarocho Verde* 11:3-12.
- Montiel R., B. y J.D. Robledo M. 1998. Caracterización, descripción y evaluación de especies frutales en el banco genético del CRUO. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. Córdoba, Veracruz, México. pp: 32-35.
- Muschler, R. G. 2006. Manejo de sombra para cafetales sostenibles. En: Pohlan, J.; L. Soto y J. Barrera (Ed.) *El cafetal del futuro, realidades y visiones*. Ed. Shaker Verlag, Aachen, Alemania. pp. 39-61.
- Nortcliff, S. (2007), Carbon sequestration in soils of Latin America, R. Lal, C.C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers and C.E.P. Cerri (eds). The Haworth Press, Binghampton, NY, 2006. ISBN 1 56022 136 4, 1 56022 137 2, xxi + 627. *Land Degrad. Dev.*, 18: 589–590. doi: 10.1002/ldr.789
- Pearson T., R.H., S. Brown and N.H. Ravindranath. 2005. Integrating carbon benefit estimates into GEF projects. United Nations Development Programme (UNDP), Global Environment Facility (GEF). New York, USA. 64 p.
- Pérez P., J.R. 2004. Colecciones ex situ de la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Ver. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 126 p.
- Rosas A.J., E. Escamilla P y O. Ruiz R. 2008. Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latino Americana* 26:375-384.
- Rügnitz T., M., M. Chacón L y R. Porro. 2008. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Consorcio Iniciativa Amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). Belém, Brasil. 63 p.
- Seeberg-Elverfeldt, C. 2010. Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 39 p.
- Segura, M., Kanninen D. Suárez M. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* 68: 143–150.
- Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jimenez F and B. De Jong. 2009. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest System* 78: 39-51.
- Suárez P., D.A. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Tesis de maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).Turrialba, Costa Rica. 131 p.
- Van Noordwijk, M., S. Rahayu, K. Hairiah, Y.C. Wulan, A. Farida and B. Verbist. 2002. Carbon stock assessment for a forest to coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China* 45: 75-86.
- Vega-López, E. 2009. Importancia económica de las áreas naturales protegidas como sumideros de carbono en México. *Economía informa* 360: 114-120.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science* 37: 29-37.