



LOS SISTEMAS AGROFORESTALES COMO ALTERNATIVA A LA CAPTURA DE CARBONO EN EL TRÓPICO MEXICANO

AGROFORESTRY SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE FOR CARBON SEQUESTRATION IN THE MEXICAN TROPICS

*Fernando Casanova-Lugo¹, Judith Petit-Aldana², Javier Solorio-Sánchez¹

¹Cuerpo Académico de Producción Animal en Agroecosistemas Tropicales. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

*Correo-e: fkzanov@gmail.com

RESUMEN

Se presenta una revisión relacionada con el papel que juegan los sistemas agroforestales (SAF) como una alternativa para la captura de carbono en los ecosistemas del trópico mexicano. Se presentan los SAF como una estrategia productiva y ecológicamente amigable con el ambiente. Asimismo se resalta la importancia de los SAF en el ciclo global de carbono, argumentando algunos aspectos relacionados con la captura de carbono en la vegetación y el suelo. Finalmente, se describen las perspectivas futuras, en relación con las necesidades de estudio para mejorar la implementación y aprovechamiento sostenible de los SAF. Se concluye que los SAF son una alternativa sostenible que ayuda a incrementar la productividad y contribuyen a mitigar el calentamiento global con una importante contribución en las zonas tropicales.

Recibido: 3 de agosto, 2010
Aceptado: 5 de noviembre, 2010
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.047
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE:
Agroforestería, almacenamiento de carbono, cambio climático, mitigación

ABSTRACT

This paper is a review regarding the role of agroforestry systems (AFS) as an alternative for carbon sequestration in ecosystems in the Mexican tropics. The AFS are presented as a productive and ecologically friendly strategy. It also highlights the importance of the AFS in the global carbon cycle, citing some factors related to carbon sequestration in vegetation and soil. Looking to the future, the need for further studies on the implementation and sustainable development of AFS is outlined. We conclude that AFS are a sustainable alternative to help increase productivity and play a significant role in mitigating global warming in the tropics.

KEY WORDS: agroforestry, carbon storage, climate change, mitigation

INTRODUCCIÓN

La expansión agropecuaria de América Latina ha ejercido una presión creciente sobre los recursos naturales y el medio ambiente. Actualmente, la producción agrícola se enfrentan a una fuerte presión por una demanda creciente de alimentos a nivel mundial (FAO, 2007).

En América Latina el sector agropecuario ha crecido durante los últimos años a una tasa anual cercana al 4 %, superior a la tasa promedio de crecimiento global (FAO, 2007). Sin embargo, debido a los sistemas agropecuarios convencionales, se presentan cifras preocupantes de degradación de recursos naturales; sobre pastoreo de praderas, mayor número de incendios, deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación de agua y

INTRODUCTION

Growth in the farming and livestock sector in Latin America has exerted increasing pressure on natural resources and the environment. Currently, agricultural production systems are facing intense pressure from growing worldwide food demand (FAO, 2007).

In Latin America, the agricultural sector has grown in recent years at an annual rate close to 4%, higher than the global average growth rate (FAO, 2007). However, due to conventional farming systems, there are worrying signals of natural resource degradation, including: overgrazing of grassland, a greater number of fires, deforestation, biodiversity loss, water pollution and vulnerability to climate change, which is a serious problem facing

vulnerabilidad al cambio climático a las cuales se enfrenta la región (Toledo y Ordóñez, 1993; FAO, 2007).

Según la FAO (2002), se puede suponer que en el futuro, gran parte de la demanda de alimentos tendrá que ser producida en áreas frágiles y limitadas para satisfacer la demanda actual, por lo que las tierras degradadas tendrán que ser estratégicamente recuperadas para incluirlas en los sistemas de producción y conservación del medio ambiente.

Por otra parte, el cambio de uso del suelo, ha sido y es una de las principales causas que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (FAO, 2007). El dióxido de carbono (CO_2) es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO_2 es responsable del 50 % del calentamiento global debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Jobbágy y Jackson, 2000).

Es importante resaltar que México se encuentra dentro de los 15 países con mayor emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Según las estadísticas actuales, las emisiones netas totales anuales de CO_2 alcanzaron 444 millones de toneladas, lo que representa aproximadamente el 2 % de las emisiones mundiales y el 96 % de las emisiones nacionales. De esta cantidad, cerca del 70 % corresponden a diversos procesos de combustión de los sectores energético, industrial, de transporte y otros servicios, y el 30 % restante se origina del proceso del cambio del uso del suelo, relacionado principalmente con la agricultura y ganadería convencional (Maserá y Sheinbaum, 2004).

Ante tal situación, es necesario encontrar estrategias productivas, ecológicas y económicamente sustentables para el manejo de los sistemas agropecuarios. Una alternativa a los problemas de degradación de los recursos naturales por cambios de uso de suelo es la implementación de SAF, que son formas de uso de la tierra, donde los árboles o arbustos interactúan biológica y económicamente en una misma superficie con cultivos y/o animales, asociados de forma simultánea o secuencial (Nair, 2004). El propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción para un manejo sostenible (Schroth *et al.*, 2001). Además, ofrecen múltiples bondades, no sólo al ambiente sino también al productor, puesto que protegen al suelo de la erosión y adicionan materia orgánica, proveen de alimento y sombra para los animales todo el año, y mantienen una alta biodiversidad (Sánchez, 1995). Asimismo, la integración de especies leñosas dentro de estos sistemas, promueven la recuperación de áreas degradadas (Razz y Clavero, 2006), así como también la captura de dióxido de carbono, el cual es uno de los principales gases causantes del efecto invernadero (Mutuo *et al.*, 2005; Ibrahim *et al.*, 2007).

the region (Toledo and Ordóñez, 1993; FAO, 2007).

According to the FAO (2002), one can assume that in the future, much of the demand for food will have to be produced in fragile and less suitable areas to meet current demand, so that degraded lands will have to be strategically reclaimed for inclusion in production systems and environmental conservation.

On the other hand, land-use change has been one of the leading causes contributing to the emission of greenhouse gases (FAO, 2007). Carbon dioxide (CO_2) is the most important gas in terms of global warming due to the volume produced each year, an increase in its atmospheric concentration and its residence time in the atmosphere. CO_2 is responsible for 50% of global warming due to absorption of thermal radiation emitted by the earth's surface (Jobbágy and Jackson, 2000).

It is important to note that Mexico is among the 15 countries with the highest greenhouse gas emissions worldwide. According to current statistics, Mexico's total annual net emissions of CO_2 have reached 444 million tons, representing around 2% of global emissions and 96% of national emissions. Of this amount, about 70% is caused by various combustion processes of the energy and industrial sectors, plus that of transportation and other sectors, and the remaining 30 % originates from the process of land-use change, mainly related to agriculture and conventional livestock farming (Maserá and Sheinbaum, 2004).

Given this situation, it is necessary to find productive, ecological and economically sustainable management strategies for agricultural systems. One alternative to the problems of natural resource degradation due to land-use changes is the implementation of agroforestry systems, which are land-use units in which trees or shrubs interact biologically and economically in the same area with crops and/or animals, integrated either simultaneously or sequentially (Nair, 2004). The main purpose is to diversify and optimize production using sustainable management practices (Schroth *et al.*, 2001). In addition, they offer multiple benefits, not only to the environment but also to the producer, as they protect the soil from erosion and add organic matter, provide food and shade for animals all year, and maintain high biodiversity (Sánchez, 1995). Furthermore, the integration of woody species in these systems promotes recovery of degraded areas (Razz and Clavero, 2006) and the capture of carbon dioxide, which is one of the main gases responsible for the greenhouse effect (Mutuo *et al.*, 2005; Ibrahim *et al.*, 2007).

Carbon storage

Carbon is the main ingredient for life on the planet and in various forms during different stages of its cycle it is

Por otra parte, a pesar de la cantidad de investigación realizada en agroforestería en cualquiera de sus modalidades, aún falta conocer mejor el potencial de estos sistemas para generar servicios ambientales. Por lo anteriormente expuesto, esta revisión discute los aspectos más importantes del papel de los sistemas agroforestales como una estrategia de regulación de dióxido de carbono en el trópico mexicano.

Almacenamiento de carbono

El carbono es la unidad principal de la vida del planeta y su ciclo es fundamental para el desarrollo de todos los organismos (Bolin y Sukumar, 2000). El carbono se almacena en compartimientos llamados “depósitos” y circula activamente entre ellos, de estos depósitos, los océanos, son los que almacenan mayor cantidad con 38,000 Giga toneladas (Gt = mil millones de toneladas), seguido por el suelo (1,500 Gt), la atmósfera (750 Gt) y las plantas (560 Gt). Cualquier desequilibrio entre los flujos de entrada y salida se refleja en la concentración del CO_2 atmosférico. La absorción del CO_2 atmosférico por las plantas a través de la fotosíntesis está en equilibrio con la respiración de las plantas y el suelo (Bolin y Sukumar, 2000).

En la Figura 1 se muestra que los principales componentes de almacenamiento de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo (COS) y la biomasa aérea. La vegetación es la encargada de incorporar el carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis, de igual manera, el suelo participa en el reciclaje y almacén de carbono en estos sistemas (Andrade e Ibrahim, 2004; FAO, 2002; Ibrahim *et al.*, 2007).

De los ecosistemas terrestres, los bosques son los que almacenan la mayor cantidad de carbono, tanto a nivel de la vegetación como de los suelos, jugando así un papel importante en el intercambio de CO_2 entre la biosfera y la atmósfera (Jaramillo, 2004). Por ejemplo, un estudio realizado en Michoacán, demostró que las existencias de carbono total en bosques de pino y roble ($222.9 - 266.9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) fueron mayores que en tierras con fines agrícolas ($82.7 - 90.8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). De la misma manera, se observó en el caso de los bosques, el suelo almacena alrededor del 40 % del carbono total en el sistema, a diferencia de las tierras agrícolas (>90 %) (Ordoñez *et al.*, 2008).

Según Masera *et al.* (1997 y 2001), a principios de los años noventa, aproximadamente un 25 % de la superficie de México (50 millones de hectáreas) estaba cubierta por bosques y selvas. De este total, prácticamente la mitad eran bosques (25.5 millones hectáreas) y la mitad selvas (24.1 millones hectáreas) (Cuadro 1). Ante tal panorámica, una de las alternativas para la restauración y recuperación de las áreas perturbadas es la agroforestería, puesto que podría contribuir de manera significativa a aumentar las reservas de carbono en la vegetación y el suelo en

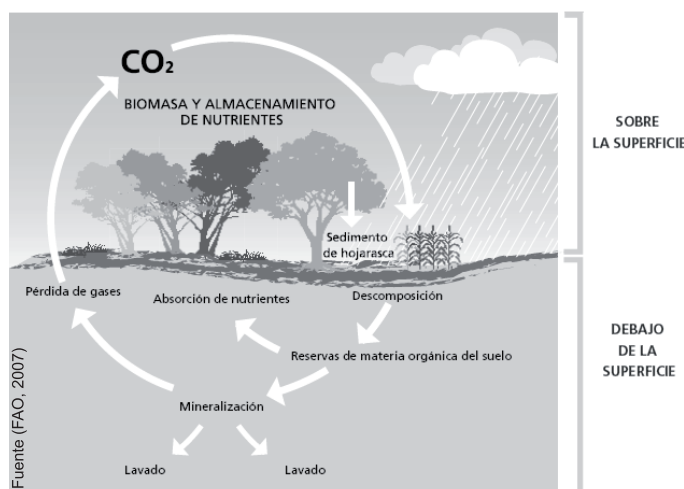


FIGURA 1. Almacenamiento de carbono debajo y sobre la superficie
FIGURE 1. Carbon storage below and above the surface

essential for the development of all organisms (Bolin and Sukumar, 2000). Carbon is stored in compartments called “reservoirs or sinks” and actively circulates among them. Of these reservoirs, the oceans store the greatest amount with 38,000 gigatons (Gt = billion tons), followed by the soil (1,500 Gt), atmosphere (750 Gt) and plants (560 Gt). Any imbalance between input and output flows is reflected in the concentration of atmospheric CO_2 . The absorption of atmospheric CO_2 by plants through photosynthesis is in balance with plant and soil respiration (Bolin and Sukumar, 2000).

Figure 1 shows the main components of carbon storage. In land use, they are soil organic carbon (SOC) and biomass. Vegetation is responsible for incorporating atmospheric carbon into the biological cycle through photosynthesis. In the same way, soil is involved in the recycling and storage of carbon in these systems (Andrade and Ibrahim, 2004; FAO, 2002; Ibrahim *et al.*, 2007).

Of the terrestrial ecosystems, forests store the most carbon, at both the vegetation and soil level, thus playing an important role in the exchange of CO_2 between the biosphere and the atmosphere (Jaramillo, 2004). For example, a study in Michoacán showed that total carbon stocks in pine and oak forests ($222.9 - 266.9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) were higher than in land used for agricultural purposes ($82.7 - 90.8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Similarly, it was observed in the case of forests that the soil stores about 40% of the total carbon in the system, unlike agricultural land (>90 %) (Ordoñez *et al.*, 2008).

According to Masera *et al.* (1997 and 2001), in the early nineties approximately 25% of the area of Mexico (50 million hectares) was covered by forests and jungles. Of this total, almost half was forests (25.5 million hectares) and half jungles (24.1 million hectares) (Table 1). Under such conditions, one of the options for the restoration and recovery of disturbed areas is agroforestry, since amongst many advantages (when compared to other types of land-

CUADRO 1. Patrón nacional de uso de suelo y sus reservorios de carbono en 1990.**TABLE 1. National land-use pattern and associated carbon reservoirs in 1990.**

	Cobertura vegetal	*Superficie	**Reservorio
Bosques naturales	Boques de coníferas	9985	2.5
	Bosques latifoliados templados	8409	1.9
	Selvas tropicales siempre verdes	5717	1.7
	Selvas tropicales subcaducifolias	15338	2.3
	Bosques semi-áridos	62840	5.0
	Bosques degradados	21484	2.6
Plantaciones	Con rotación prolongada	3	0.0006
	Plantaciones de restauración	147	0.0265
Bosques manejados	Coníferas	6444	1.5
	Selvas tropicales siempre verdes	900	0.28
Áreas protegidas	Templado	672	0.16
	Tropical siempre verde	1765	0.54
	Tropical caducifolio	106	0.02
	Áreas pantanosas	303	0.09
	Bosques semiáridos	3170	0.30
Otros usos	Agricultura	25939	2.3
	Pastizales	24893	2.4
	Agroforestería	900	0.1
			23.7
*Miles de hectáreas; **Gt C			

Fuente: Masera *et al.*, 1997 y 2001Source: Masera *et al.*, 1997 and 2001

comparación con otras actividades como la agricultura y la ganadería convencional.

Por lo anterior, se considera que México posee condiciones favorables para el almacenamiento de carbono, sin embargo, este potencial está influenciado por varios factores, puesto que la acumulación de carbono está relacionada con la edad del sistema (Acosta-Mireles *et al.*, 2002), la estructura (Albrecht y Kandji, 2003), el manejo silvícola (Peichl *et al.*, 2006) y, las condiciones edáficas como textura e historia de uso del suelo (FAO, 2002). En este sentido, Acosta-Mireles *et al.* (2002), propuso que, el factor determinante en el almacenamiento de carbono es el tiempo de establecimiento; pero no existe un consenso entre los científicos para determinar cuáles son los factores que afectan la capacidad de los sistemas para almacenar carbono (Roncal-García *et al.*, 2008).

La agroforestería como alternativa para la captura de carbono

Los sistemas agroforestales (SAF) involucran la presencia de especies leñosas perennes (i.e. árboles y arbustos), que interactúan con los componentes tradicionales (cultivos, herbáceas forrajeras y animales), todo bajo un esquema integral (Sánchez, 1995).

use such as agriculture and conventional livestock farming), it could contribute significantly to increasing carbon stocks in vegetation and soil.

Though Mexico is considered to have favourable conditions for carbon sequestration, there is some uncertainty about the exact conditions for optimum storage. It is known that the system potential for carbon sequestration is influenced by several factors, since carbon buildup is related to the age of the system (Acosta-Mireles *et al.*, 2002), structure (Albrecht and Kandji, 2003), forest management (Peichl *et al.*, 2006) and soil conditions such as texture and land-use history (FAO, 2002). In this regard, Acosta-Mireles *et al.* (2002) suggested that the determining factor in carbon storage is the settling time, but there is no consensus among scientists to identify the factors that affect the ability of systems to store carbon (Roncal-García *et al.*, 2008).

Agroforestry as an alternative for carbon sequestration

Agroforestry systems (AFS) involve the presence of woody perennials (i.e. trees and shrubs), which interact with the traditional components (crops, forage grasses

A pesar de las diversas modalidades de los SAF que se practican a nivel mundial, su aplicación es más extendida en los trópicos. Aproximadamente el 20 % de la población mundial (1,200 millones de personas), dependen directamente de los productos agroforestales y de sus servicios en los países en desarrollo (Pandey, 2002). Dada su importancia y uso generalizado, una cuestión importante que debe abordarse es si la agroforestería aplicada pudiera satisfacer las demandas locales, además de promover la captura y almacenamiento de carbono, para obtener beneficios económicos, y ayudar a mitigar la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Sánchez, 1995; Nair, 2004).

Estos sistemas pueden mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos. En efecto, la agroforestería fomenta prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos y plantas, enfatizando la vegetación perenne y el reciclaje de nutrientes, contribuyendo a almacenar carbono a largo plazo (Nair, 2004).

Existe una amplia gama de estudios (Albrecht y Kandji, 2003; Montagnini y Nair, 2004; Palm *et al.*, 2005; Bayla *et al.*, 2006; Haile *et al.*, 2008; Nair *et al.*, 2009; Shibu, 2009; Schoeneberger, 2009; Casanova *et al.*, 2010a) que fundamentan el hecho de que los SAF, incluso si no están diseñados principalmente para el secuestro de carbono, ofrecen una oportunidad para aumentar las reservas de carbono en la biosfera terrestre (Cuadro 2).

En el contexto del ciclo global del carbono, Pandey (2002) menciona que, la agroforestería es importante por dos razones:

- El componente arbóreo en SAF, fija el carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis y lo almacena en el suelo. Más concretamente, los árboles empleados en los SAF actúan como secuestradores de carbono.
- La agroforestería contribuye a la reducción de la deforestación de bosques y selvas por actividades relacionadas con el sector agropecuario.

Dixon (1995), afirma que el potencial de almacenamiento de carbono de los SAF oscila entre 12 a 228 t·ha⁻¹, teniendo mayor potencial en las zonas del trópico húmedo y tienen la capacidad de almacenar hasta 70 t·ha⁻¹ en la vegetación (biomasa aérea) y 25 t·ha⁻¹ en los primeros 20 cm de profundidad del suelo (Mutuo *et al.*, 2005).

Algunos autores (Albrecht y Kandji, 2003), indican que los SAF podrían acumular entre 1.1 y 2.2 Gt en los próximos 50 años en todo el mundo, con lo que podría reducir significativamente el efecto del CO₂ sobre la atmósfera. Ibrahim *et al.* (2005), expresa que el almacenamiento de carbono puede variar entre 20 y 204 t·ha⁻¹, estando la mayoría de este carbono almacenado

CUADRO 2. Potencial de la agroforestería para el almacenamiento de carbono* en América Latina

TABLE 2. Agroforestry potential for carbon storage* in Latin America

	Eco-región	Sistema	t·ha ⁻¹
América del sur	Trópico húmedo bajo	Agrosilvicultura	39-102
	Tierras bajas secas		39-195
América del norte	Trópico húmedo alto	Silvopastoril	133-154
	Trópico húmedo bajo	Silvopastoril	104-198
	Tierras bajas secas	Silvopastoril	90-175

*Los valores de almacenamiento de carbono fueron estandarizados a 50 años de rotación.

* The carbon storage values were standardized to 50-year rotation

Fuente: Winjum *et al.*, 1992; Brown *et al.*, 1993.

Source: Winjum *et al.*, 1992; Brown *et al.*, 1993.

and animals), all under an integrated framework (Sánchez, 1995).

Despite the various forms of AFS practiced worldwide, their application is more widespread in the tropics. Approximately 20% of the world's population (1.2 billion people) depends directly on agroforestry products and services in developing countries (Pandey, 2002). Given its importance and widespread use, an important issue to be addressed is whether applied agroforestry could satisfy local demands, in addition to promoting carbon capture and storage, to obtain economic benefits and help mitigate the buildup of CO₂ in the atmosphere (Sánchez, 1995; Nair, 2004).

These systems can maintain and even increase carbon stocks in vegetation and soils. Indeed, agroforestry promotes sustainable low-input practices that minimize disturbance of soils and plants, emphasizing perennial vegetation and nutrient cycling, thus contributing to long-term carbon storage (Nair, 2004).

There is a wide range of studies (Albrecht and Kandji, 2003; Montagnini and Nair, 2004; Palm *et al.*, 2005; Bayla *et al.*, 2006; Haile *et al.*, 2008; Nair *et al.*, 2009; Shibu, 2009; Schoeneberger, 2009; Casanova *et al.*, 2010a) that support the fact that the AFS, even if they are not designed primarily for carbon sequestration, offer an opportunity to increase carbon stocks in the terrestrial biosphere (Table 2).

In the context of the global carbon cycle, Pandey (2002) mentions that agroforestry is important for two reasons:

- The tree component in AFS fixes carbon from the atmosphere through photosynthesis and stores it in the soil. More specifically, the trees used in the AFS

en los suelos, pudiendo incluso tener incrementos de C anual que pueden variar entre 1.8 y 5.2 t·ha⁻¹. En ciertos casos, el depósito por encima del suelo de los SAF está cerca de aquellos reportados para bosques secundarios. Además, el depósito de carbono en el suelo aumenta en la agroforestería (Nair, 2004).

Estudios realizados en cuatro localidades del municipio de Chilón en Chiapas, México, se evaluó la influencia de la edad y la complejidad de los SAF en los diferentes reservorios de carbono (*i.e.* biomasa y materia orgánica del suelo). En el (Cuadro 3) se muestran los resultados más sobresalientes los cuales indican que, la complejidad del sistema taungya, barbecho natural y barbecho enriquecido incrementó el carbono en la biomasa viva y muerta; mientras que el carbono en la biomasa muerta de la milpa tradicional disminuye con la edad. En el sistema taungya y el barbecho natural se encontraron tendencias positivas entre la acumulación de carbono en la biomasa viva y el tiempo de establecimiento. Se esperaría que el barbecho enriquecido en su madurez igualara al barbecho natural en cuanto a su acumulación de carbono. Los sistemas intervenidos acumularon mayores volúmenes de carbono total que los sistemas tradicionales de similares edades. El mayor reservorio de carbono en los SAF fue la materia orgánica suelo con más del 70 % del carbono total, mientras la biomasa viva y muerta aportaron casi un tercio del carbono total (Roncal-García *et al.*, 2008).

Otro estudio realizado en Chiapas, México comparó el contenido de carbono en la biomasa viva, el suelo y la materia orgánica muerta entre diversos usos de la tierra y tres zonas agro-climáticas (alta, intermedia y baja). Los resultados indican que el carbono en biomasa viva y la materia orgánica dependen del uso de la tierra, mientras

CUADRO 3. Reservorios de carbono total en cuatro sistemas agroforestales evaluados en Chiapas, México.

TABLE 3. Total carbon reservoirs in four agroforestry systems evaluated in Chiapas, Mexico.

Reservorios (t·ha ⁻¹)	Milpa con árboles	Taungya	Acahual natural	Acahual enriquecido
Edad promedio (años)	3.7	6.8	23.8	7.3
Biomasa viva	9.2	16.9	59.3	42.0
Materia orgánica muerta	9.7	2.9	8.5	2.9
Materia orgánica del suelo	108.9	89.5	109.8	105.2
Carbono total del sistema	127.9	109.4	117.6	150.1

Fuente: Roncal-García *et al.*, 2008 modificado.
Source: Roncal-García *et al.*, 2008 modified.

act as carbon sequestrators.

• Agroforestry contributes to reduced deforestation of forests and jungles by activities related to the farming and livestock sector. This is important because deforestation is a major contributor to greenhouse gas emissions worldwide.

Dixon (1995) states that the carbon storage potential of the AFS ranges from 12 to 228 t·ha⁻¹, having greater potential in humid tropical areas and the ability to store up to 70 t·ha⁻¹ in vegetation (aerial biomass) and 25 t·ha⁻¹ in the first 20 cm of soil depth (Mutuo *et al.*, 2005).

Some authors (Albrecht and Kandji, 2003) indicate that agroforestry systems could accumulate between 1.1 and 2.2 Gt in the next 50 years worldwide, which could significantly reduce the effect of CO₂ on the atmosphere. Ibrahim *et al.* (2005) state that carbon storage can vary between 20 and 204 t·ha⁻¹, with most of the carbon stored in soils, and that the AFS may even have annual C increases ranging from 1.8 to 5.2 t·ha⁻¹. In some cases, the deposit over the soil in the AFS is close to those reported for secondary forests. In addition, the carbon reservoir in the soil increases in agroforestry (Nair, 2004).

Studies conducted in four communities within the municipality of Chilón in Chiapas, Mexico, assessed the influence of the age and complexity of the AFS on the different carbon reservoirs (*i.e.* biomass and soil organic matter). Table 3 shows the most significant results which indicate that the complexity of the taungya system, natural fallow and enriched fallow increased carbon in living and dead biomass, while the carbon in the traditional milpa dead biomass decreases with age. In the taungya system and the natural fallow, positive trends were found between the accumulation of carbon in living biomass and the settling time. One would expect that the enriched fallow at maturity would equal the natural fallow in terms of carbon accumulation. Operated systems accumulated larger amounts of total carbon than traditional systems of similar age. The largest carbon reservoir in the AFS was the soil organic matter with over 70% of the total carbon, while the living and dead biomass contributed nearly a third of the total carbon (Roncal-García *et al.*, 2008).

Another study in Chiapas, Mexico compared the carbon content in living biomass, soil and dead organic matter between different land uses and three agro-climatic zones (high, medium and low). The results indicate that the carbon in living biomass and organic matter depends on land use, while soil carbon and total organic carbon were influenced mainly by the agro-climatic zone. They also show that all agroforestry systems store more carbon than traditional systems, but especially silvopastoral systems, improved fallows, taungya systems and organic coffee crops under shade with values of 142.5, 155.2, 155.5 and

que el carbono del suelo y el carbono orgánico total fueron influenciados principalmente por la zona agro-climática. Asimismo, muestran que todos los SAF almacenan más carbono que los sistemas tradicionales. Especialmente, los sistemas silvopastoriles, los barbechos mejorados, los sistemas taungya y, los cultivos de café orgánico bajo sombra con valores de 142.5, 155.2, 155.5 y 213.8 t C·ha⁻¹, respectivamente (Soto-Pinto *et al.*, 2010).

Por su parte, Callo-Concha *et al.* (2004), estimaron la acumulación de carbono en la biomasa aérea de algunos usos de la tierra en Veracruz, México, durante un ciclo de producción. Los sistemas utilizados fueron: 1) cítricos asociados con plátano; 2) cítricos asociados con café; 3) cítricos asociados con café y plátano; 4) cítricos con pastoreo de borregos; 5) cítricos asociados con cultivos de cobertura y 6) pastura en monocultivo. Los resultados sugieren que los cítricos contribuyen entre el 65 y el 88 % del carbono arbóreo. Asimismo, el mayor aporte de carbono total lo genera la biomasa arbórea. En cuatro de los cinco SAF evaluados, su aporte varía entre 95.7 y 97.8 %. El sistema basado en cítricos y borregos pelibuey, tuvo la mayor acumulación de carbono con 63.4 t·ha⁻¹ y el menor fue la pastura (Cuadro 4).

Casanova *et al.* (2010) estimaron el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, radical y la hojarasca entre bancos forrajeros de especies leñosas (dos en monocultivo y uno mixto), en Yucatán, México. Los resultados sugieren que los bancos de forraje en monocultivo almacenaron la mayor cantidad de carbono en la biomasa aérea (14.7–10.4 t·ha⁻¹) y radical (8.1–6.1 t·ha⁻¹). Sin embargo, el banco de forraje mixto acumuló la mayor cantidad de carbono en la hojarasca (1.6 t·ha⁻¹), que los monocultivos (1.0 t·ha⁻¹). Asimismo, observaron que el carbono total depende altamente del arreglo de la plantación puesto que la cantidad de carbono almacenado en el banco de forraje mixto fue 28.1 % menor que los bancos de forraje en monocultivo.

213.8 t C·ha⁻¹, respectively (Soto-Pinto *et al.*, 2010) .

For their part, Callo-Concha *et al.* (2004) estimated the carbon accumulation in the aerial biomass of some land uses in Veracruz, Mexico, during a production cycle. The systems used were 1) citrus fruits associated with banana; 2) citrus fruits associated with coffee; 3) citrus fruits associated with coffee and bananas; 4) citrus fruits with sheep grazing; 5) citrus fruits associated with cover crops; and 6) pasture in monoculture. The results suggest that citrus fruits contribute between 65 and 88 % of tree carbon. In addition, the largest contribution of total carbon is provided by the tree biomass. In four of the five SAF evaluated, their contribution varies between 95.7 and 97.8 %. The system based on citrus fruits and pelibuey sheep had the highest carbon accumulation with 63.4 t·ha⁻¹ and the lowest was the pasture (Table 4).

Casanova *et al.* (2010) estimated carbon storage in aerial biomass, root and leaf litter in fodder banks of woody species (two in monoculture and one mixed) in Yucatán, Mexico. The results suggest that the monoculture fodder banks store the greatest amount of carbon in aerial biomass (14.7–10.4 t·ha⁻¹) and root (8.1–6.1 t·ha⁻¹). However, the mixed fodder bank accumulated the highest amount of carbon in leaf litter (1.6 t·ha⁻¹), rather than the monocultures (1.0 t·ha⁻¹). They also observed that total carbon is highly dependent on the planting arrangement since the amount of carbon stored in the mixed fodder bank was 28.1% lower than in the monoculture fodder banks.

This is consistent with Kurst and Burschel (1993), who stated that the amount of carbon sequestered by the tree component in agroforestry systems varies between 3.0 and 25.0 t·ha⁻¹, being highly dependent on the tree species used, planting density, the age of the components, local conditions and climate, soil types and applied management practices (e.g. pruning or timber harvesting). In addition, the net effects on carbon storage will depend on the

CUADRO 4. Carbono acumulado (t·ha⁻¹) por algunos sistemas de uso de la tierra evaluados en Veracruz, México
TABLE 4. Carbon accumulated (t·ha⁻¹) by some land-use systems evaluated in Veracruz, Mexico

Sistema agroforestal [*]	Componente			Total
	Arbóreo	Herbáceo	Hojarasca	
Ci+Cf	39.2-72.9	0.09-0.18	1.14-1.37	40.5-73.2
Ci+PI	30.0-56.9	0.0-0.0	1.74-2.64	32.6-59.0
Ci+Cf+PI	41.8-76.4	0.07-0.16	0.89-1.92	43.4-77.3
Ci+Co	37.2-41.8	0.16-0.17	0.51-1.13	37.9-44.8
Ci+Pe	61.8-93.4	0.04-0.15	1.1-2.15	63.4-94.7
Pastura	0.0-0.0	0.22-0.98	0.82-1.58	1.4-2.1
*Ci+Cf = Cítricos + Café, Ci+PI = Cítricos + Plátano, Ci+Cf+PI = Cítricos + Café + Plátano, Ci+Pe = Cítricos + Borregos pelibuey, Ci+Co = Cítricos + Cobertura.				
*Ci+Cf = Citrus fruits + Coffee, Ci+PI = Citrus fruits + Banana, Ci+Cf+PI = Citrus fruits + Coffee + Banana, Ci+Pe = Citrus fruits + Pelibuey sheep, Ci + Co = Citrus fruits + Coverage.				

Fuente: Callo-Concha *et al.*, 2004 modificado.
Source: Callo-Concha *et al.*, 2004 modified.

Lo anterior concuerda con Kursten y Burschel (1993), quienes manifestaron que la cantidad de carbono capturado por el componente arbóreo en los SAF, oscila entre 3.0 y 25.0 t·ha⁻¹, siendo altamente dependiente de las especies arbóreas utilizadas, la densidad de la plantación, la edad de los componentes, de las condiciones locales y del clima, el tipo de suelo y las prácticas de manejo aplicado (e.g. la poda o la cosecha de madera). Además, los efectos netos sobre el almacenamiento de carbono dependerán del contenido de carbono antes de la implementación de las tecnologías agroforestales.

En este sentido, Schroeder (1994) menciona que hay por lo menos tres categorías de tierras ideales para la implementación de tecnologías agroforestales:

- Las tierras que actualmente se encuentran degradadas y no productivas
- Las tierras agrícolas o de pastoreo que podría complementarse con la plantación de árboles, y
- Las tierras agrícolas con barbecho.

Las dos primeras categorías se visualizan como reservorios de carbono agotados. Por lo tanto, el aumento neto de carbono proporcionado por la conversión a la agroforestería sería más significativo en estas condiciones.

Las prácticas de agroforestales no sólo tienen el potencial para almacenar carbono y ayudar a mitigar el CO₂ de la atmósfera a través del crecimiento de los árboles y arbustos, también tienen fuertes implicaciones para el desarrollo sostenible debido a los beneficios sociales y ambientales que prestan (Shibu, 2009). Al mismo tiempo pueden ayudar a alcanzar la seguridad alimentaria y garantizar la tenencia de la tierra en los países en desarrollo, aumentar los ingresos agrícolas, restaurar y mantener la diversidad, mantener las reservas hidrológicas y reducir la erosión del suelo (Sánchez, 1995; Pandey, 2002; Petit *et al.*, 2009; Casanova *et al.*, 2010b). Por lo tanto, la agroforestería ofrece una alternativa sustentable al aprovechar las ventajas de varios estratos de la vegetación. Igualmente al aumentar la biomasa, no sólo se crean almacenes de carbono en forma de árboles y productos maderables, sino que se aumenta la biodiversidad, ayudando a evitar el agotamiento de los recursos naturales ya existentes (Sánchez, 1995; Petit *et al.*, 2009).

Perspectivas de la agroforestería

A nivel mundial, los SAF pueden secuestrar el carbono en la vegetación y el suelo a una tasa de 0.2 a 3.1 t·ha⁻¹·año⁻¹. En efecto, algunas de las estimaciones indican que dichos sistemas tienen el potencial para secuestrar hasta 7.0 Gt de carbono en un periodo aproximado de 50 años. Sin embargo, se necesita mayor información de cada país o región para confirmar esta estimación (Pandey,

carbon content prior to the implementation of agroforestry techniques.

In this regard, Schroeder (1994) mentions that there are at least three categories of land ideal for the implementation of agroforestry technologies:

- Lands that are currently degraded and unproductive
- Agricultural land or pasture which could be supplemented by planting trees and
- Fallow agricultural fields.

The first two categories are seen as exhausted carbon reservoirs. Therefore, the net increase in carbon provided by the conversion to agroforestry would be more significant in these conditions.

Agroforestry practices not only have the potential to store carbon and help mitigate the CO₂ in the atmosphere through the growth of trees and shrubs, they also have strong implications for sustainable development due to the social and environmental benefits they provide (Shibu, 2009). At the same time they can help to achieve food security and secure land tenure in developing countries, increase farm income, restore and maintain diversity, maintain water reserves and reduce soil erosion (Sánchez, 1995; Pandey, 2002; Petit *et al.*, 2009; Casanova *et al.*, 2010b). Therefore, agroforestry offers a sustainable alternative to take advantage of several layers of vegetation. Also by increasing biomass, it not only creates carbon stocks in the form of trees and wood products, but it also increases biodiversity, helping prevent the depletion of existing natural resources (Sánchez, 1995; Petit *et al.*, 2009).

Agroforestry prospects

Globally, agroforestry systems can sequester carbon in vegetation and soil at a rate of 0.2 to 3.1 t·ha⁻¹·yr⁻¹. Indeed, some estimates indicate that these systems have the potential to sequester up to 7.0 Gt of carbon over a period of approximately 50 years. However, more information is needed from each country or region to confirm this estimate (Pandey, 2002).

Despite the recognition that AFS have as carbon stores, the inherent variability in the estimates and the lack of uniform methodologies have made it difficult to compare the carbon sequestration potential of agroforestry systems. For example, in a recent review, Nair *et al.* (2009) showed that carbon sequestration of aerial and subterranean

2002).

A pesar del reconocimiento que poseen los SAF como almacenes de carbono, la variabilidad inherente en las estimaciones y la falta de metodologías uniformes han hecho difícil la comparación sobre el potencial de secuestro de carbono en SAF. Por ejemplo, en una revisión reciente, Nair *et al.* (2009), demostraron que el secuestro de carbono de la biomasa aérea y subterránea en SAF varió de 0.29 t·ha⁻¹·año⁻¹ en un banco de forraje en África occidental a 15.2 t·ha⁻¹·año⁻¹ en parcelas mixtas en Puerto Rico. También, estimaciones de carbono en el suelo sugieren que estos sistemas almacenan en un rango de 1.25 t·ha⁻¹ en cultivos en callejones del sur Canadá, y 173 t·ha⁻¹ en un sistema silvopastoril de la costa atlántica de Costa Rica.

Lo anterior refleja la necesidad de realizar estudios con la finalidad conocer las opciones y mecanismos para optimizar el almacenamiento de carbono y la restauración de suelos, y con ello contribuir a la mitigación de gases efecto invernadero y con ello ratificar el papel de estos agroecosistemas como proveedores de servicios ambientales.

El éxito de la agroforestería implica beneficios sociales, ecológicos y económicos, en este sentido, los esfuerzos deben estar encaminados al:

- Uso de especies locales con alto potencial para mantener la biodiversidad y lograr la sostenibilidad de los sistemas de producción.
- Reducción de las emisiones de CO₂ y otros gases efecto invernadero como contribución de los sistemas agropecuarios al medio ambiente.
- Identificación de opciones de manejo específicas para cada zona agroecológica considerando las exigencias de crecimiento de las especies, los ciclos climáticos y las prácticas actuales de manejo.
- Implementación de modelaje y desarrollo de herramientas para la cuantificación de carbono.
- Así como, el desarrollo de políticas adecuadas, pago por servicios ambientales y mecanismos de financiamiento para el almacenamiento de carbono.

Aunque actualmente se está dando la reconversión de la ganadería y la agricultura tropical, los planteamientos y los beneficios potenciales de los SAF son racionales y diversos, como lo confirman algunos intelectuales, académicos y productores que han experimentado las virtudes de dichos sistemas.

CONCLUSIONES

Los sistemas actuales de producción agropecuaria

biomass in AFS ranged from 0.29 t·ha⁻¹·yr⁻¹ in a fodder bank in West Africa to 15.2 t·ha⁻¹·yr⁻¹ in mixed plots in Puerto Rico. Also, soil carbon estimates suggest that these systems store in the range of 1.25 t·ha⁻¹ in alley cropping in southern Canada, and 173 t·ha⁻¹ in a silvopastoral system on the Atlantic coast of Costa Rica.

The uncertainties demonstrate reflects the need to conduct studies in order to know the options and mechanisms required to optimize carbon storage and soil restoration, thereby contributing to the mitigation of greenhouse gases and thus confirming the role of agroecosystems as providers of environmental services.

The success of agroforestry implies social, ecological and economic benefits. In this regard, efforts should be directed to:

- Use of local species with high potential for maintaining biodiversity and achieving sustainability of production systems.
- Reducing emissions of CO₂ and other greenhouse gases as a contribution by agricultural systems to the environment.
- Identification of specific management options for each agro-ecological zone, taking into account the growth requirements of the species, weather cycles and current management practices.
- Implementation of modeling and development of tools for the quantification of carbon.
- And, the development of appropriate policies, payment for environmental services and financing mechanisms for carbon storage.

Although livestock farming and tropical agriculture are currently undergoing large-scale change in response to global, regional, and local pressures, the approaches and potential benefits of agroforestry systems are rational and diverse, and the material presented here attests to the great variety of academics who, through their research and experiences, have come to see great potential in these systems.

CONCLUSIONS

The current systems of agricultural production have led to the degradation of natural resources. However, changes or adjustments can be made for environmental purposes without harming productivity, incorporating sustainable management practices, conservation awareness and transfer of agroforestry technologies, mainly in degraded and disturbed areas.

han conducido a la degradación de los recursos naturales. Sin embargo, pueden hacerse transformaciones o adaptaciones; con fines ambientales sin menospreciar la productividad, incorporando estrategias de manejo sostenible, conciencia conservacionista y transferencia de tecnologías agroforestales, principalmente en áreas degradadas y perturbadas.

La adopción de prácticas agroforestales es una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano, debido a que contribuyen a la reducción de emisiones de dióxido de carbono principal causante del efecto invernadero, amortiguan la presión sobre los ecosistemas vulnerables (bosques y selvas) y aportan bienestar socioeconómico a las comunidades rurales.

LITERATURA CITADA

- ACOSTA-MIRELES, M.; VARGAS-HERNÁNDEZ, A.; VELÁSQUEZ-MARTÍNEZ, A.; ECHEVERS-BARRA, J. D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca. México. *Agrociencia*, 36: 725-736.
- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99: 15-27. DOI: **10.1016/S0167-8809(03)00138-5**.
- ANDRADE, H.; IBRAHIM, M. 2004. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. *Agroforestería en las Américas*, 10 (39-40): 109-116.
- BAYLA, J.; BALESDENT, J.; MAROL, C.; ZAPATA, F.; TEKLEHAIMANOT, Z.; OUEDRAOGO, S. J. 2006. Relative contribution of trees and crops to soil carbon content in a parkland system in Burkina Faso using variations in natural ^{13}C abundance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76: 193-201. DOI: **10.1007/s10705-005-1547-1**.
- BOLIN, B.; SUKUMAR, R. 2000. Global Perspective. In: *land Use, Land-Use change and Forestry*, R.T. WATSON, I. R. NOBLE, B. BOLIN, N. H. RAVINDRANATH, D. J. VERARDO, D. J. DOKKEN (eds.). Cambridge University Press. Cambridge. UK, pp 23-51.
- BROWN, S., HALL, C., KNABE, W., RAICH, J., TREXLER, M.C., WOOMER, P. 1993. Tropical forests: Their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution*. 70: 71-94. DOI: **10.1007/BF01104989**.
- CALLO-CONCHA, D.; RAJAGOPHAL, I.; KRISHNAMURTHY, L. 2004. Secuestro de carbono por sistemas agroforestales en Veracruz. *Ciencia UANL*, 7(2): 60-65.
- CASANOVA, L. F.; CAAMAL M. J. A.; PETIT A. J. C.; SOLORIO S. F. J.; CASTILLO C. J. B. 2010a. Acumulación de carbono en la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1): 45-50.
- CASANOVA, L. F.; RAMÍREZ, A. L.; SOLORIO S. F. J. 2010b. Efecto del intervalo de poda sobre la biomasa foliar y radical en árboles forrajeros en monocultivo y asociados. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12: 33-41.
- DIXON, R. K. 1995. Agroforestry system: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*, 31: 99-116. DOI: **10.1007/BF00711719**.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos - 96. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 76 p.
- FAO. 2007. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Pagos a los agricultores por servicios ambientales. *Agricultura* - 38. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 255 p.
- HAILE, S. G.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D. 2008. Carbon storage of different soil-size fractions in Florida silvopastoral systems. *Journal of Environment and Quality*, 37: 1789-1797. DOI: **10.2134/jeq2007.0509**.
- IBRAHIM, M.; CHACÓN, M.; CUARTAS, C.; NARANJO, J.; PONCE, G.; VEGA, P.; CASASOLA, F.; ROJAS, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 45: 27-36.
- IBRAHIM, M.; CHACÓN, M.; MORA, J.; ZAMORA, S.; GOBBI, J.; LLANDEDERAL, T.; HARVEY, C.; MURGUEITIO, E.; CASASOLA, F.; VILLANUEVA, C.; RAMÍREZ, E. 2005. Opportunities for carbon sequestration and conservation of water resources on landscapes dominated by cattle production in Central America. In: Henry A. Wallace/CATIE Inter-American Scientific Conference Series, Integrated management of environment services in human-dominated tropical landscape. Turrialba, Costa Rica, CATIE. pp. 27-34.
- JARAMILLO, V. 2004. El ciclo global del Carbono. In: *Cambio climático: una visión desde México*. INE/SEMARNAT. México, D.F. pp.16-27.
- JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10: 423-36. DOI: **10.1890/1051-0761(2000)010**.
- KURSTEN, E.; BURSCHEL, P. 1993. CO₂ Mitigation by Agroforestry. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70: 553-544. DOI: **10.1007/BF01105020**.
- MASERA, O.; CERÓN, A.; ORDOÑEZ, M. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Climatic Change*, 6 (3-4): 289-310.
- MASERA, O.; SHEINBAUM, C. 2004. Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional". In: FERNÁNDEZ, A.; MARTÍNEZ, J.; OSNAYA P. (eds.). *Cambio climático: una visión desde México*". INE-Semarnat, México. pp.355-368. DOI: **10.1023/A:1013327019175**.
- MASERA, O.; ORDOÑEZ, M.; DIRZO, R. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: Current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, 35:265-295. DOI: **10.1023/A:1005309908420**.
- MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. 2004. Carbon sequestration: An under-

End of English Version

- exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61-21: 281-295. DOI: **10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79**.
- MUTUO, P.K., CADISCH, G., ALBRECHT, A., PALM, C.A., VERCHOT, L. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 71: 43-54. DOI: **10.1007/s10705-004-5285-6**.
- NAIR, P. K. 2004. Agroforestry: Trees in support of sustainable agriculture. In: HILLEL, H.; ROSENZWEIG, C.; POWLSON, D.; SCOW, K.; SINGER, M.; SPARKS, D. (eds). *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, London, U.K. pp. 35-44.
- NAIR, P. K.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172: 10-23. DOI: **10.1002/jpln.200800030**.
- ORDOÑEZ, J. A. B.; DE JONG, B. H. J.; GARCÍA-OLIVA, F.; AVIÑA, F. L.; PÉREZ, J. V.; GUERRERO, G.; MARTÍNEZ, R.; MASERA, O. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255: 2074-2084. DOI: **10.1016/j.foreco.2007.12.024**.
- PALM, C. A.; VAN NOORDWIJK, M.; WOOMER, L.; ALEGRE, J.; ARÉVALO, L.; CASTILLA, C.; CORDEIRO, D.; HAIRIAH, K.; KOTTO-SAME, J.; MOU-KAM, A.; PARTON, J.; RICE, A.; RODRÍGUEZ, V.; SITOMPUL, M. 2005. Carbon losses and sequestration following land use change in the humid tropics. *Alternatives to Slash and Burn: The Search for Alternatives*. In: CHERYL A. PALM; STEPHEN A.; VOSTI; PEDRO A.; SÁNCHEZ; POLLY J. ERICKSEN (eds). Columbia University Press, New York, USA.
- PANDEY, D. N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*. 2 (4):367-377. DOI: **10.3763/cpol.2002.0240**.
- PEICHL, M.; THEVATHASAN, V.; GORDON, A.; HUSS, J.; ABOHASSAN, R. 2006. Carbon sequestration potentials in temperature tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 66: 243-257. DOI: **10.1007/s10457-005-0361-8**.
- PETIT, A. J. C.; CASANOVA, L. F.; SOLORIO, S. F. J. 2009. Asociación de especies arbóreas forrajeras para mejorar la productividad y el reciclaje de nutrientes. *Agricultura Técnica en México*. 35 (11): 107-116.
- RAZZ, R.; CLAVERO, T. 2006. Cambios en las características químicas de suelos en un banco de *Leucaena leucocephala* y en un monocultivo de *Brachiaria brizantha*. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 23: 326-331.
- RONCAL-GARCÍA, S.; SOTO-PINTO, L.; CASTELLANOS-ALBORES, J.; RAMÍREZ-MARCIAL, N.; DE JONG, B. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(3): 200-206.
- SANCHEZ, P. A. 1995. Science in agroforestry. *Agroforestry Systems*. 30: 5-55. DOI: **10.1007/BF00708912**.
- SCHOENEBERGER, M. 2009. Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry Systems*, 75: 27-37. DOI: **10.1007/s10457-008-9123-8**.
- SCHROEDER, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 27: 89-97. DOI: **10.1007/BF00704837**.
- SCHROTH, G.; LEHMANN, J.; RODRIGUEZ, M. R.; BARROS, E.; MACEDO, J. L. 2001. Plant-soil interactions in multi state agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 53(2): 85-102. DOI: **10.1023/A:1013360000633**.
- SHIBU J. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76: 1-10. DOI: **10.1007/s10457-009-9229-7**.
- SOTO-PINTO L, ANZUETO M., MENDOZA J., JIMÉNEZ FERRER G., DE JONG B. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 78 (1): 39-51. DOI: **10.1007/s10457-009-9247-5**.
- TOLEDO, V. M.; ORDOÑEZ, J. M. 1993. The biodiversity scenario of Mexico: a review of terrestrial habits. In: *Biological Diversity of Mexico: Origins and distribution*. Oxford University Press, Oxford, New York. pp. 757-777.
- WINJUM, J.K., DIXON, K., SCHROEDER, P. 1992. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air and Soil Pollution*. 64: 213-228. DOI: **10.1007/BF00477103**.