



Revista Chapingo. Serie Ciencias
Forestales y del Ambiente

ISSN: 2007-3828

rforest@correo.chapingo.mx

Universidad Autónoma Chapingo
México

Casanova-Lugo, Fernando; Ramírez-Avilés, Luis; Parsons, David; Caamal-Maldonado,
Arturo; Piñeiro-Vázquez, Angel T.; Díaz-Echeverría, Víctor
Environmental services from tropical agroforestry systems
Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. XXII, núm. 3,
septiembre-diciembre, 2016, pp. 269-284
Universidad Autónoma Chapingo
Chapingo, México

Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62946911002>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's homepage in redalyc.org

redalyc.org

Scientific Information System

Network of Scientific Journals from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal

Non-profit academic project, developed under the open access initiative

Environmental services from tropical agroforestry systems

Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales

Fernando Casanova-Lugo^{1*}; Luis Ramírez-Avilés²; David Parsons³;
Arturo Caamal-Maldonado²; Angel T. Piñeiro-Vázquez²; Víctor Díaz-Echeverría¹.

¹Instituto Tecnológico de la Zona Maya, Tecnológico Nacional de México. Carretera Chetumal-Escárcega km 21.5, Ejido Juan Sarabia. C. P. 77960, Quintana Roo, México.

fkzanov@gmail.com Tel.: +52 (983) 1293431 (*Corresponding author).

²Universidad Autónoma de Yucatán, Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Carretera Mérida-Xmatkuil km 15.5. C. P. 97100. Yucatán, México.

³University of Tasmania, School of Land and Food. Private Bag 98, Hobart, Tasmania, Australia.

Abstract

The purpose of this review is to discuss the role of agroforestry systems in providing environmental services, including more diverse and sustainable agricultural production, increased carbon stocks and enhanced biodiversity conservation, plus improved soil fertility, methane emission mitigation, and water and air quality. There is evidence that agroforestry systems have an important role in providing environmental services, as approximately 20 % of the world's population, primarily in rural and urban areas of developing countries, depends directly on agroforestry products. The adoption of agroforestry contributes to reduced greenhouse gas emissions (carbon dioxide and methane), diminishes the pressure on vulnerable ecosystems, and improves the livelihoods of rural communities.

Keywords: Biodiversity, carbon sequestration, methane emissions, soil fertility, water conservation.

Resumen

El propósito de esta revisión es discutir el papel de los sistemas agroforestales en la prestación de servicios ambientales, incluyendo producción agrícola más diversificada y sostenible, aumento de reservas de carbono, conservación de la biodiversidad, mejora de la fertilidad del suelo, mitigación de emisiones de metano y calidad del agua y aire. Existe evidencia de que los sistemas agroforestales juegan un papel importante en la prestación de servicios ambientales, ya que aproximadamente 20 % de la población mundial, sobre todo las zonas rurales y urbanas de los países en desarrollo, depende directamente de los productos agroforestales. La adopción de sistemas agroforestales contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y metano), disminuye la presión sobre los ecosistemas vulnerables y mejora las condiciones de vida de las comunidades rurales.

Palabras clave: Biodiversidad, captura de carbono, emisiones de metano, fertilidad del suelo, conservación del agua.

Introduction

Agroforestry systems (AFS) provide diverse products and can potentially provide environmental services similar to or even greater than natural ecosystems (Nair, Gordon, & Mosquera-Losada, 2008). Evidence supporting these benefits has been gathered only recently (Shibu, 2009). Although scientific reports supporting these benefits have increased noticeably within the last decade, they have generally focused on single agroforestry ecosystem services, for instance, impacts on biodiversity conservation in tropical landscapes (Schroth et al., 2004), soil fertility (Schroth & Sinclair, 2003) or potential carbon sequestration (Montagnini, 2006; Montagnini, Somarriba, Murgueitio, Fassola, & Eibl, 2015).

Agroforestry management favors farming diversification through maximizing vegetation stratum use; moreover, they provide basic products, and economic and environmental benefits from a multifunctional landscape (Shibu, 2009). Many AFS management techniques are practiced worldwide, but they are most commonly applied in the tropics; approximately 20 % of the world's population depends directly on agroforestry products and services (Pandey, 2002). Therefore, the objective of this paper is to analyze and summarize the literature related to ecosystem services provided by AFS in the tropics.

Definition of agroforestry

The World Agroforestry Centre defines agroforestry as the cultivation of trees in association with crops and livestock either in a spatial mixture or in a temporal sequence. Garrett (2009) describes AFS as a land use practice where woody perennials interact biologically with crops and livestock in the same space, with the fundamental purpose to diversify and optimize productivity by taking into account the principle of sustainability. Recently, Nair et al. (2008) defined agroforestry as landscape management involving trees and shrubs interacting with crops and livestock under an integral scheme in temporal or sequential phases, offering a wide variety of benefits and services.

Despite some differences in the exact definition of agroforestry, all of them recognize that integrating trees and shrubs with other elements of agriculture (i. e. crops and livestock) can increase soil fertility, reduce soil erosion, improve water and air quality, favor biodiversity, enhance aesthetic appeal, increase carbon capture and storage, and reduce methane emissions from livestock (Ganry, Feller, Harmand, & Guibert, 2001; Harvey & González-Villalobos, 2007; Montagnini, 2006; Montagnini et al., 2015; Nair et al., 2008; Nair, Kumar, & Nair, 2009; Palm et al., 2005; Pandey, 2002; Schroth & Sinclair, 2003; Schroth et al., 2004). In

Introducción

Los sistemas agroforestales (SAF) ofrecen diversos productos y pueden proporcionar servicios ambientales similares o incluso superiores que los ecosistemas naturales (Nair, Gordon, & Mosquera-Losada, 2008). La evidencia que respalda estos beneficios se ha recopilado recientemente (Shibu, 2009). Aunque los informes científicos que respaldan estos beneficios han aumentado notablemente en la última década, se han centrado en un solo servicio ambiental agroforestal; por ejemplo, impactos en la conservación de la biodiversidad en paisajes tropicales (Schroth et al., 2004), fertilidad del suelo (Schroth & Sinclair, 2003) o potencial de secuestro de carbono (Montagnini, 2006; Montagnini, Somarriba, Murgueitio, Fassola, & Eibl, 2015).

El manejo forestal favorece la diversificación de la agricultura al maximizar el uso de la vegetación de estrato; además, proporciona productos básicos y beneficios económicos y ambientales de un paisaje multifuncional (Shibu, 2009). En el mundo se practican muchas formas de manejo de SAF, pero se aplican con mayor frecuencia en los trópicos; aproximadamente 20 % de la población mundial depende directamente de productos y servicios agroforestales (Pandey, 2002). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue analizar y resumir la literatura relacionada con los servicios de los ecosistemas proporcionados por los SAF en los trópicos.

Definición de agroforestería

El Centro Mundial de Agroforestería define este término como el cultivo de árboles en asociación con los cultivos y/o ganado, ya sea en mezcla espacial o secuencia temporal. Garrett (2009) describe a los SAF como una práctica de uso de suelo donde las especies leñosas perennes interactúan biológicamente con cultivos y/o ganado en el mismo espacio, con el propósito fundamental de diversificar y optimizar la productividad, teniendo en cuenta el principio de sostenibilidad. Recientemente, Nair et al. (2008) definieron la agroforestería como el manejo del paisaje, que involucra árboles o arbustos interactuando con cultivos y/o ganado en un esquema integral en fases temporales o secuenciales, ofreciendo una amplia variedad de beneficios y servicios.

A pesar de algunas diferencias en la definición exacta de la agroforestería, todos reconocen que la integración de árboles o arbustos con otros elementos de la agricultura (es decir, cultivos y ganado) puede aumentar la fertilidad del suelo, reducir la erosión, mejorar la calidad del agua y aire, favorecer la biodiversidad, mejorar el atractivo estético, aumentar la captura y almacenamiento de carbono y reducir las emisiones de metano del ganado (Ganry, Feller, Harmand, & Guibert,

addition, Shibu (2009) recognized that these diverse ecosystem services vary at different spatial scales (local, regional, or global) (Table 1).

Services from agroforestry systems

Carbon sequestration. Carbon sequestration is the capture and storage of atmospheric carbon into carbon sinks (e. g. oceans, vegetation, or soils) through physical and biological processes (Ibrahim, Villanueva, & Mora, 2005). Incorporating trees and shrubs into AFS can markedly increase carbon sequestration compared with other systems like monoculture pastures. Besides storing important amounts of carbon in aboveground biomass, they can also store greater amounts of carbon in belowground biomass (Nair et al., 2009). Pandey (2002) declared that, in the context of carbon cycling, agroforestry is important for two reasons: 1) the tree component captures atmospheric carbon through photosynthesis and stores it underground, behaving as a carbon sink; and, 2) agroforestry reduces deforestation of temperate and tropical forests related to clearing for agriculture.

A wide range of studies (Albrecht & Kandji, 2003; Ibrahim et al., 2005; Montagnini et al., 2015; Nair et al., 2009; Palm et al., 2005; Schroth et al., 2004; Shibu, 2009) support the concept that AFS is a unique opportunity to increase carbon reserves in the terrestrial biosphere,

2001; Harvey & González-Villalobos, 2007; Montagnini, 2006; Montagnini et al., 2015; Nair et al., 2008; Nair, Kumar, & Nair, 2009; Palm et al., 2005; Pandey, 2002; Schroth & Sinclair, 2003; Schroth et al., 2004). Además, Shibu (2009) reconoció que dichos servicios ambientales varían a distintos niveles espaciales (local, regional o global) (Cuadro 1).

Servicios a partir de sistemas agroforestales

Captura de carbono. Consiste en capturar y almacenar carbono atmosférico en sumideros de carbono (por ejemplo, océanos, vegetación o suelos), a través de procesos físicos y biológicos (Ibrahim, Villanueva, & Mora, 2005). La incorporación de árboles y arbustos en los SAF puede aumentar la captura de carbono notablemente, en comparación con otros sistemas como los pastos de monocultivo. Además de almacenar cantidades importantes de carbono en la biomasa aérea, también se pueden almacenar cantidades de carbono mayores en la biomasa subterránea (Nair et al., 2009). Pandey (2002) declaró que, en el contexto del ciclo de carbono, la agroforestería es importante por dos razones: 1) el componente árbol captura carbono atmosférico mediante la fotosíntesis y lo almacena bajo tierra, comportándose como un sumidero de carbono y 2) la agroforestería reduce la deforestación de bosques tropicales y templados relacionados con el desmonte para la agricultura.

Table 1. Landscape scale and ecosystem services provided by agroforestry systems.

Cuadro 1. Escala de paisaje y servicios ambientales proporcionados por los sistemas agroforestales.

Services/Servicios	Landscape scale/Escala de paisaje		
	Local	Regional	Global
Net primary production/Producción primaria neta			
Pest control/Control de plagas			
Pollination-seed dispersal/ Polinización-dispersión de semillas			
Soil enrichment/Enriquecimiento del suelo			
Soil stabilization-erosion control/ Estabilización del suelo-control de erosión			
Clean water/Agua limpia			
Flood mitigation/Mitigación de inundaciones			
Clean air/Aire limpio			
Carbon sequestration/Captura de carbono			
Biodiversity/Biodiversidad			
Aesthetics-cultural/Estética-cultural			

Source: Shibu (2009)

Fuente: Shibu (2009)

even if AFS were not originally designed for that purpose. Dixon (1995) estimated that a total area of 585 to 1,215 million ha implementing agroforestry management (in Africa, Asia, and America) has the potential to capture and store 1.1 to 2.2 Pg of carbon in vegetation and soils, over a period of 50 years. However, Nair et al. (2009) estimated that the world's agroforestry area amounts to 1,023 million ha. Using the mean carbon sequestration values of Dixon (1995) and a stable agroforestry area, we estimate a potential carbon capture and storage of 1.9 Pg in a period of 50 years (Nair et al., 2009).

There is also enormous potential for additional carbon sequestration from a huge area of croplands and degraded pastures in the tropics, which could be transformed by agroforestry management practices (Shibu, 2009). However, carbon sequestration potential is related to the kind of system, species, spatial design, age, geographic placement, environmental factors, and management practices (Ibrahim et al., 2005; Shibu, 2009). This variability inherent in AFS and the lack of uniform methodologies have hindered estimations of carbon sequestration of AFS. For example, (Nair et al., 2009) found that above and below ground biomass carbon sequestration of AFS varied from 0.29 Mg·ha⁻¹·yr⁻¹ in a forage bank in West Africa, to 15.2 Mg·ha⁻¹·yr⁻¹ in mixed plots in Puerto Rico. In addition, an estimated 1.25 Mg·ha⁻¹ of soil carbon is stored in alley cropping AFS in southern Canada, in comparison with 173 Mg·ha⁻¹ in silvopastoral systems on the atlantic coast of Costa Rica (Nair et al., 2009). In general, agroforestry systems in arid, semiarid, and degraded zones have less carbon sequestration potential than those in wet and fertile zones; and, temperate zones have less potential than tropical zones (Nair et al., 2009). These factors affect the C storage capacity in different stocks within the system: biomass C ranges from 9 to 54 % of total C, and soil C ranges from 46 to 91 % of total C in the system. Table 2 shows the characteristics (i. e. age, species, and soils) of selected AFS in Mexico, and their C storage capacity.

Methane emissions. Methane (CH₄) is one of the products of fermentation and metabolism of carbohydrates in the rumen. Methane, carbon dioxide (CO₂), and nitrous oxide (NO₂) represent the main greenhouse gases produced by ruminants (Pinares-Patiño, Muetzel, Molnaro, Hunt, & Clark, 2010). Eighty million tons of CH₄ are produced annually in the world (Eckard, Grianger, & de Klein, 2010) with ruminants responsible for 30 % of these emissions. Methane has a global warming potential 23 times greater than CO₂, and represents a loss of between 5 to 18 % of gross energy consumed by ruminants; however, this figure is more pronounced in animals fed diets high in fiber and low in quality (Eckard et al., 2010).

Una extensa variedad de estudios (Albrecht & Kandji, 2003; Ibrahim et al., 2005; Montagnini et al., 2015; Nair et al., 2009; Palm et al., 2005; Schroth et al., 2004; Shibu, 2009) apoyan el concepto de que el SAF es una oportunidad única para aumentar las reservas de carbono en la biosfera terrestre, incluso si no fue diseñado originalmente para ese propósito. Dixon (1995) estimó que una superficie total de 585 a 1,215 millones de hectáreas con manejo agroforestal (en África, Asia y América) tiene potencial para capturar y almacenar 1.1 a 2.2 Pg de carbono en vegetación y suelos, durante un periodo de 50 años. Nair et al. (2009) estimaron que el área agroforestal del mundo asciende a 1,023 millones de hectáreas. Utilizando los valores medios de la captación de carbono de Dixon (1995) y un área agroforestal estable, se estima un potencial de captura de carbono y almacenamiento de 1.9 Pg en un periodo de 50 años (Nair et al., 2009).

También existe un enorme potencial para la captura de carbono adicional de una gran superficie de tierras de cultivo y pastos degradados en trópicos, que podrían ser transformados mediante prácticas de manejo agroforestal (Shibu, 2009). Sin embargo, el potencial de captura de carbono está relacionado con el tipo de sistema, especies, diseño espacial, edad, ubicación geográfica, factores ambientales y prácticas de manejo (Ibrahim et al., 2005; Shibu, 2009). Esta variabilidad inherente al SAF y a la falta de metodologías uniformes ha obstaculizado las estimaciones de captura de carbono. Por ejemplo, (Nair et al., 2009) encontraron que la captura de carbono en biomasa por encima y debajo del suelo de los SAF, en un banco de forraje en África occidental, variaron de 0.29 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ a 15.2 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ en parcelas mixtas en Puerto Rico. Además, los autores estimaron que 1.25 Mg·ha⁻¹ de carbono en suelo se almacena en los SAF de cultivo en franjas en el sur de Canadá, en comparación con 173 Mg·ha⁻¹ en sistemas silvopastoriles en la costa atlántica de Costa Rica. En general, los SAF en zonas áridas, semiáridas y degradadas tienen menos potencial de captura de carbono que los de zonas húmedas y fértiles; mientras que las zonas templadas tienen menos potencial que las zonas tropicales (Nair et al., 2009). Estos factores afectan la capacidad de almacenamiento de carbono en diferentes reservorios dentro del sistema: el carbono en biomasa oscila entre 9 y 54 % del total de carbono y el carbono en suelo varía de 46 a 91 % del carbono total en el sistema. En el Cuadro 2 se muestran las características (edad, especie y suelos) de los SAF seleccionados en México y su capacidad de almacenamiento de carbono.

Emisiones de metano. El metano (CH₄) es uno de los productos de fermentación y metabolismo de carbohidratos en el rumen. El metano, dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (NO₂) representan los principales gases de efecto

Table 2. Carbon sequestration in different agroforestry systems in Mexico.**Cuadro 2. Captura de carbono en distintos sistemas agroforestales en México.**

System (species)/ Sistema (especies)	Soil type/ Tipo de suelo	Age (Years)/ Edad (Años)	C stock (Mg·ha ⁻¹)/ Existencia de C (Mg·ha ⁻¹)			Source/ Fuente
			Biomass/ Biomasa	Soil/ Suelo	Total	
Pasture with scattered trees / Pasto con árboles dispersos						
<i>Sabal mexicana</i> Mart. <i>Vatairea lundellii</i> (Standl.) Record <i>Guarea glabra</i> Vahl <i>Albizia adinocephala</i> (Donn. Sm.) Record <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. <i>Spondias mombin</i> L. <i>Swietenia macrophylla</i> King.	Luvisol	>15.0	74.0	68.5	143.0	Soto-Pinto, Anzueto, Mendoza, Jiménez- Ferrer, and de Jong (2010)
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit <i>Cocos nucifera</i> L. <i>Pennisetum purpureum</i> Schumach.	Fluvisol	n. d.	128.6	n. d.	n. d.	Anguiano, Aguirre, and Palma (2013)
Fodder banks / Bancos de forraje						
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	Leptosol	7.0	14.0	n. d.	14.0	Casanova-Lugo, Caamal-Maldonado, Petit-Aldana, Solorio-Sánchez, and Castillo-Caamal (2010)
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Leptosol	7.0	14.3	n. d.	14.3	Casanova-Lugo et al. (2010)
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit. <i>Guazuma ulmifolia</i> . Lam.	Leptosol	7.0	15.0	n. d.	15.0	Casanova-Lugo et al. (2010)
Improved fallows / Barbecho mejorado						
<i>Swietenia macrophylla</i> King. <i>Cedrela odorata</i> L. <i>Pinus oocarpa</i> Schiede	Luvisol	6.9	51.2	104.0	155.2	Soto-Pinto et al. (2010)
<i>Cedrela odorata</i> L. <i>Swietenia macrophylla</i> King. <i>Tabebuia</i> sp. <i>Ceiba</i> sp.	Regosol	3.0-7.0	44.9	105.2	150.1	Roncal-García, Soto-Pinto, Castellanos-Albores, Ramírez-Marcial, and de Jong (2008)
Living fences / Cercas vivas						
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp.	Luvisol	>15.0	70.1	60.6	130.7	Soto-Pinto et al. (2010)
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp. <i>Brachiaria decumbens</i> Stapf	Fluvisol	31.0	6.48	113.3	119.8	Soto-Pinto et al. (2010)
Taungya / Sistema taungya						
<i>Zea mays</i> L. <i>Swietenia macrophylla</i> King. <i>Cedrela odorata</i> L. <i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq.) Dugand	Luvisol	3.0-7.0	42.8	112.7	155.5	Soto-Pinto et al. (2010)
<i>Zea mays</i> L. <i>Cedrela odorata</i> L. <i>Swietenia macrophylla</i> King. <i>Tabebuia</i> sp <i>Ceiba</i> sp.	Regosol	6.8	19.8	89.5	109.3	Roncal-García et al. (2008)

n. d. = not determined / n. d. = no determinado

Source: compiled by authors / Fuente: elaboración propia

Ruminant grazing systems in the tropics are characterized by low forage availability and quality at certain times of year. Feeding systems based on cellulose leads to increased acetic acid production, releasing a large amount of metabolic hydrogen (H_2) which is used as substrate for the production of CH_4 . In comparison with diets high in starch, ruminal fermentation favors the production of propionate (Pinares-Patiño et al., 2010).

In the tropics there are a diversity of trees and shrubs, such as *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Piscidia piscipula* (L.) Sarg., *Pithecellobium saman* (Jacq.) Benth., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp., *Sesbania sesban* (L.) Merr. that have great potential for feeding ruminants (Ferrer et al., 2007; Pinares-Patiño et al., 2010). These tree species have a wide range of secondary metabolites such as coumarins, phenols, condensed tannins and saponins, which can significantly reduce enteric CH_4 emissions (Dias-Moreira et al., 2013; Silivong, Xaykham, Aloun, & Preston, 2012). Condensed tannins (CT) have the ability to form complexes with proteins and carbohydrates, making them less digestible and fermentable in the rumen, thereby reducing the formation of H_2 specific substrates for methane formation and substantially reducing enteric CH_4 formation (Pinares-Patiño et al., 2010). Additionally, condensed tannins possess the ability to significantly reduce the bacterial population of the rumen protozoa which are responsible for the formation of substrates for the synthesis of CH_4 . Several studies (Abdalla et al., 2007; Berra, Finster, & Valtorta, 2009; Dias-Moreira et al., 2013) argue that through the manipulation of protozoan and bacterial populations, secondary metabolites of trees and shrubs can reduce CH_4 emissions by 25.7 % to 36.9 % (Table 3). Steroidal saponins are an abundant compound in some tropical trees and shrubs. Their main mode of action on the modification of rumen fermentation is through defaunation of protozoa which are directly responsible for CH_4 . These compounds are present in the foliage and fruit of species such as *Sapindus saponaria* L., *P. saman*, *G. sepium*, and *E. cyclocarpum*, which have been intensively studied (Hess et al., 2004; Silivong et al., 2012). Reports show a reduction in CH_4 emissions ranging from 10.5 % in sheep (Hess et al., 2004) to 70 % in goats (Silivong et al., 2012) (Table 3).

Soil fertility. It is indisputable that decreasing vegetation cover has caused a reduction in nutrient cycling and soil fertility (Sanginga et al., 2003). As deforestation and ecosystem deterioration in the tropics has occurred in part due to land clearing for conventional livestock raising, strategies to help mitigate its negative impacts on the environment have been developed. Indeed, modern agroforestry was developed as a strategy to improve sustainability

invernadero producidos por rumiantes (Pinares-Patiño, Muetzel, Molnaro, Hunt, & Clark, 2010). Ochenta millones de toneladas de CH_4 se producen anualmente en el mundo (Eckard, Grianger, & de Klein, 2010), donde los rumiantes son responsables del 30 % de estas emisiones. El metano tiene un potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el CO_2 y representa una pérdida de entre 5 y 18 % de energía bruta consumida por rumiantes; sin embargo, esta cifra es más marcada en animales alimentados con dietas altas en fibra y de baja calidad (Eckard et al., 2010).

Los sistemas de pastoreo de rumiantes en el trópico se caracterizan por la baja disponibilidad y calidad del forraje en ciertas épocas del año. Los sistemas de alimentación a base de celulosa conducen a una mayor producción de ácido acético, liberando una gran cantidad de hidrógeno metabólico (H_2) que se utiliza como sustrato para la producción de CH_4 . En comparación con las dietas con alto contenido de almidón, la fermentación ruminal favorece la producción de propionato (Pinares-Patiño et al., 2010).

En los trópicos existe una gran diversidad de árboles y arbustos, tales como *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Piscidia piscipula* (L.) Sarg., *Pithecellobium saman* (Jacq.) Benth., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. y *Sesbania sesban* (L.) Merr. con potencial para la alimentación de rumiantes (Ferrer et al., 2007; Pinares-Patiño et al., 2010). Estas especies de árboles tienen una gran variedad de metabolitos secundarios tales como cumarinas, fenoles, taninos condensados y saponinas que pueden reducir significativamente las emisiones de CH_4 entérico (Dias-Moreira et al., 2013; Silivong, Xaykham, Aloun, & Preston, 2012). Los taninos condensados (TC) tienen la capacidad de formar complejos con proteínas e hidratos de carbono, lo que los hace menos digeribles y fermentables en rumen, reduciendo la formación de sustratos específicos de H_2 para la formación de metano y sustancialmente reducen la formación de CH_4 entérico (Pinares-Patiño et al., 2010). Además, los TC poseen la capacidad de reducir significativamente la población bacteriana de los protozoarios ruminales, que son responsables de la formación de sustratos para la síntesis de CH_4 . Algunos estudios (Abdalla et al., 2007; Berra, Finster, & Valtorta, 2009; Dias-Moreira et al., 2013) sostienen que a través de la manipulación de protozoarios y poblaciones bacterianas, los metabolitos secundarios de árboles y arbustos pueden reducir las emisiones de CH_4 de 25.7 % a 36.9 % (Cuadro 3). Las saponinas esteroides son otros compuestos abundantes en algunos árboles y arbustos tropicales; su principal mecanismo de acción en la modificación de la fermentación ruminal mediante la defaunación de protozoarios que están directamente encargados del CH_4 . Dichos compuestos están presentes en el follaje y frutos de las especies, tales como *Sapindus*

Table 3. Potential of selected tropical fodder trees to mitigate methane emissions in ruminants.**Cuadro 3. Potencial de árboles forrajeros tropicales seleccionados para la mitigación de emisiones de metano de rumiantes.**

Tree fodder/ Árboles forrajeros	Metabolite/ Metabolito	Intake/Consumo	Ruminant/ Ruminante	MEM (%)	Source/Fuente
<i>Sapindus saponaria</i> L.	Saponins/ Saponinas	7.71 g·day ⁻¹ / 7.71 g·día ⁻¹	Sheep/ Ovejas	10.5	Hess et al. (2004)
<i>Mimosa caesalpineae</i> Benth.	Tannins/ Taninos	0.91 % of the ration/ 0.91 % de la proporción	Sheep/ Ovejas	28.0	Abdalla et al. (2007)
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp.	Saponins/ Saponinas	214 g DM·day ⁻¹ / 214 g MS·día ⁻¹	Goats/ Cabras	70.0	Silivong et al. (2012)
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	Tannins/ Taninos	40 g·kg ⁻¹ of DM/ 40 g·kg ⁻¹ de MS	Sheep/ Ovejas	25.7	Dias-Moreira et al. (2013)

MEM: Methane emission mitigation, DM: Dry matter / MEM: Mitigación de emisiones de metano, MS: Materia seca

Source: compiled by authors / Fuente: elaboración propia

of agroecosystems (Nair et al., 2008); however, mismanagement can lead to system fragmentation, as has been the case in traditional AFS.

Forest ecosystems are closed and efficient systems (Petit, Casanova, & Solorio, 2009). They have high rates of return and low rates of losses, and are thus self-sustaining. On the other hand, many conventional agroecosystems (e. g., monocrops) are open or permeable, with relatively low rates of return and high rates of losses. AFS are positioned between these two extremes, with more efficient nutrient cycling than conventional agricultural systems and similar productivity to forest ecosystems. Nair et al. (2008) claimed that the difference between AFS and other agricultural land use practices lies in the transference or recovery of nutrients into the system from one component to another, and the possibility of managing the system or its components to increase nutrient recycling rates without affecting total productivity.

The role of AFS in improvement and stabilization of long-term soil productivity and sustainability is well documented (Nair et al., 2008; Schroth & Sinclair, 2003). Inclusion of nitrogen fixing trees and crops is a common practice in tropical AFS; however, non-fixing trees can also improve the physical, chemical, and biological characteristics of soils through organic material shed and nutrient cycling (Petit-Aldana, Uribe-Valle, Casanova-Lugo, Solorio-Sánchez, & Ramírez-Avilés, 2012). Trees have deep root systems which serve as an underground net through which nutrients can be captured from deep in the soil profile. These nutrients are returned to the soil via leaf litter, increasing the nutrient recycling efficiency of the system (Allen et al., 2004). Furthermore, trees have long life cycles,

saponaria L., *P. saman*, *G. sepium* y *E. cyclocarpum* que se han estudiado de manera profunda (Hess et al., 2004; Silivong et al., 2012). Los informes muestran una reducción en las emisiones de CH₄, que van de 10.5 % en ovejas (Hess et al., 2004) a 70 % en cabras (Silivong et al., 2012) (Cuadro 3).

Fertilidad del suelo. Es indiscutible que la disminución de la cubierta vegetal ha causado una reducción en el ciclo de nutrientes y fertilidad del suelo (Sanginga et al., 2003). Tal como se ha producido la deforestación y el deterioro de los ecosistemas en los trópicos, en parte debido al desmonte de tierras para la ganadería convencional, también se han desarrollado estrategias para ayudar a mitigar el impacto negativo en el medio ambiente. De hecho, la agroforestería moderna se desarrolló como una estrategia para mejorar la sostenibilidad de los agroecosistemas (Nair et al., 2008); sin embargo, el mal manejo puede conducir a la fragmentación del sistema, como ha sido el caso en los SAF tradicionales.

Los ecosistemas forestales son sistemas eficientes y cerrados (Petit, Casanova, & Solorio, 2009). Estos ecosistemas tienen tasas altas de rendimiento y tasas bajas de pérdidas y, por tanto, son autosostenibles. Por otra parte, muchos agroecosistemas convencionales (por ejemplo, monocultivos) son abiertos o permeables, con tasas de rendimiento relativamente bajas y tasas altas de pérdidas. Los SAF se sitúan entre estos dos extremos, con un ciclo de nutrientes más eficientes en comparación con los sistemas agrícolas convencionales y productividad similar a la de los ecosistemas forestales. Nair et al. (2008) afirmaron que la diferencia entre los SAF y otras prácticas agrícolas se encuentra en la transferencia o recuperación de los nutrientes en el sistema de un

increasing capture of nutrients before and after the crop cycle that might otherwise be lost. In locations where shifting cultivation practices include planting trees to improve the fallow cycle, trees can minimize soil fertility decline (Ganry et al., 2001; Sanginga et al., 2003). Soil inorganic N, aerobic mineralization, and biomass can be significantly higher after crop rotation with N fixing trees than with non N fixing trees and/or pastures (Harmand & Balle, 2001). For herbaceous fallows, greater organic material accumulation in soils, nutrient storage in biomass, and greater density and vertical distribution of roots help maintain nutrient reserves by reducing leaching and/or “pumping” nutrients from the deepest soil layers to the soil surface (Nair et al., 2008).

Uribe and Petit (2007) analyzed the influence of vegetation cover (*L. leucocephala*, *Mucuna pruriens* (L.) DC. and secondary vegetation) and crop rotation intervals on soil fertility restoration of crop lands in Yucatán, Mexico. Their results indicated that short crop rotation intervals contribute to restoring soil fertility, depending on the species. *Leucaena leucocephala* enhanced K, Ca, and Mg content; *M. pruriens* increased NO₃ content; and, secondary vegetation increased organic matter content.

Biodiversity conservation. The urgent need for designing effective strategies for biodiversity conservation has attracted enormous worldwide attention. Scientists and politicians are increasingly aware of agroforestry’s role in biodiversity conservation in both tropical and temperate regions. The importance of agroforestry in biodiversity conservation has been highlighted recently by numerous authors (Harvey, González, & Somarriba, 2006; McNeely, 2004; Schroth et al., 2004). Shibu (2009) indicated that agroforestry plays five fundamental roles in biodiversity conservation: a) provides habitat to perturbation tolerant species; b) permits preservation of germplasm of sensitive species; c) helps to reduce habitat destruction, providing more productive and sustainable alternatives to conventional (i. e. modern) agricultural systems that require increasingly more land; d) supplies connectivity through corridors between habitat remnants, creating an integrating net that increases the conservation of flora and fauna; and e) provides services in erosion control and groundwater recharge, preventing habitat degradation and loss.

Harvey and González-Villalobos (2007) studied bird and bat assemblages from undisturbed forests; two AFS, cacao (*Theobroma cacao* L.) and banana (*Musa* sp.); and plantain monocultures at an indigenous reservation in Talamanca, Costa Rica. They found that AFS maintained bat and bird assemblages that were as (or more) species-rich, abundant and diverse as forests, and had the same basic suite of dominant species. However, the species

componente a otro, y la posibilidad de manejar el sistema o sus componentes para aumentar las tasas de reciclaje de nutrientes sin afectar la productividad total.

El papel del SAF en la mejora y estabilización de la productividad del suelo a largo plazo y en la sostenibilidad está bien documentado (Nair et al., 2008; Schroth & Sinclair, 2003). La inclusión de cultivos y árboles fijadores de nitrógeno es una práctica común en los SAF tropicales; sin embargo, los árboles no fijadores también pueden mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos mediante materia orgánica y ciclos de nutrientes (Petit-Aldana, Uribe-Valle, Casanova-Lugo, Solorio-Sánchez, & Ramírez-Avilés, 2012). Los árboles tienen raíces profundas que sirven como red subterránea para capturar los nutrientes desde el fondo del perfil del suelo. Estos regresan al suelo por medio de hojarasca, aumentando la eficiencia de reciclado de nutrientes del sistema (Allen et al., 2004). Además, los árboles tienen ciclos largos de vida, lo que incrementa la captura de nutrientes antes y después del ciclo de cultivo, que de otra manera podrían perderse. Los árboles pueden minimizar el descenso de la fertilidad del suelo en los lugares donde las prácticas de cultivo incluyen la plantación de estos, para mejorar el ciclo de barbecho (Ganry et al., 2001; Sanginga et al., 2003). El N inorgánico del suelo, la mineralización aerobia y la biomasa pueden ser significativamente mayores después de la rotación de cultivos con árboles fijadores de N en comparación con los no fijadores o los pastos (Harmand & Balle, 2001). En el caso de los barbechos herbáceos, la mayor acumulación de materia orgánica en suelos, almacenamiento de nutrientes en biomasa y mayor densidad y distribución vertical de raíces ayudan a mantener las reservas de nutrientes, al disminuir la lixiviación o “bombeo” de nutrientes de las capas más profundas a la superficie del suelo (Nair et al., 2008).

Uribe y Petit (2007) analizaron la influencia de la cubierta vegetal (*L. leucocephala*, *Mucuna pruriens* [L.] DC. y vegetación secundaria) y los intervalos de rotación de cultivos en la restauración de fertilidad del suelo en tierras de cultivo en Yucatán, México. Los resultados indicaron que los intervalos cortos de rotación de cultivos contribuyen a la restauración de la fertilidad del suelo, dependiendo de la especie. *Leucaena leucocephala* incrementó el contenido de K, Ca y Mg; *M. pruriens* aumentó el contenido de NO₃; y la vegetación secundaria aumentó el contenido de materia orgánica.

Conservación de la biodiversidad. La necesidad urgente de diseñar estrategias efectivas para la conservación de la biodiversidad ha atraído una enorme atención en todo el mundo. Los científicos y políticos son cada vez más conscientes del papel de la agroforestería en la conservación de la biodiversidad,

composition of these assemblages was highly modified. On the other hand, the plantain monocultures had highly modified and disparate assemblages of both birds and bats.

Homegardens are another type of agroforestry system that have been studied for conservation values, and are well known for their high species diversity. Many ecologists consider their structure and functionality to closely resemble those of natural forests (Kabir & Webb, 2009). Kumar and Nair (2004) reported species richness of tropical homegardens ranging from 27 in Sri Lanka to 602 in West Java, Indonesia. Furthermore, in tropical zones where agriculture has eliminated forest cover, homegardens and AFS are refuges for many species. For instance, in Bangladesh, where forest cover is less than 10 % of original cover, homegardens (which are implemented by at least 20 million households) are an important source of conservation. Kabir and Webb (2009) recorded the floristic and structural diversity of 402 homegardens from six regions of Bangladesh, and found 419 species, 59 % of which were native, and six with some conservation priority status.

Crop combinations and spatial arrangements of AFS influence density and species diversity of insect populations. Brandle, Hodges, and Zhou (2004) reported a high density and diversity of insects in windbreaks. They associated this diversity with the heterogeneous windbreak profile, which provides a wide variety of microhabitats at every life cycle stage, and resource availability, including hosts, prey, pollen, and nectar. AFS provide an appropriate habitat for wildlife due to the high complexity of landscape structure and composition. Windbreaks, tree barriers, and riparian damping zones offer a woody habitat for wildlife in landscapes dominated by agriculture (Harvey et al., 2006; Harvey & González-Villalobos, 2007).

Da Silva, da Gama-Rodrigues, da Gama-Rodrigues, Machado, and Baligar (2009) compared the distribution of meso- and macro-fauna communities in soils and leaf litter between a cacao AFS and a natural forest in south Bahia, Brasil. Results suggested that a high diversity of plants in agroforestry systems and natural forest provide more microhabitats and heterogeneity in the leaf litter, and thus greater biodiversity in soils. They concluded that these AFS have beneficial effects for soil fauna communities, and can be used as a strategy for their conservation.

Habitat loss and fragmentation are major threats to biodiversity (Harvey et al., 2006; Harvey & González-Villalobos, 2007; Schroth et al., 2004). In Latin America, land use change from natural forests to pasture has caused changes in the size and distribution of forest remnants, loss of biodiversity, and water pollution (Harvey, Alpizar, Chacón, & Madrigal, 2005). Remnant

tanto en regiones tropicales como en templadas. La importancia de la agroforestería en la conservación de la biodiversidad ha sido destacada recientemente por varios autores (Harvey, González, & Somarriba, 2006; McNeely, 2004; Schroth et al., 2004). Shibu (2009) indicó que la agroforestería desempeña cinco funciones fundamentales en la conservación de la biodiversidad: a) provee un hábitat para especies tolerantes a la perturbación; b) permite la preservación de germoplasma de especies sensibles; c) reduce la destrucción del hábitat, proporcionando alternativas más productivas y sostenibles para los sistemas agrícolas convencionales (es decir, modernas) que requieren cada vez más tierras; d) proporciona conectividad mediante corredores entre los remanentes del hábitat, creando una red de integración que aumenta la conservación de la flora y fauna; y e) proporciona servicios de control de erosión y recarga de aguas subterráneas, evitando la degradación y pérdida del hábitat.

Harvey y González-Villalobos (2007) estudiaron conjuntos de aves y murciélagos de bosques sin perturbaciones en dos SAF de cacao (*Theobroma cacao* L.) y plátano (*Musa* sp.), y en monocultivos de plátano en una reserva indígena en Talamanca, Costa Rica. Los autores encontraron que los SAF mantuvieron a las aves y murciélagos; que fueron similares (o más) ricos en especies, abundantes y diversos como los bosques; y que tuvieron el mismo hábitat de especie dominante; sin embargo, la composición de las especies de estos conjuntos fue altamente modificada. Por otra parte, los monocultivos de plátano tuvieron conjuntos altamente modificados y dispares tanto en aves como en murciélagos.

Los huertos familiares son otro tipo de sistema agroforestal que ha sido estudiado para la conservación, y son conocidos por su alta diversidad de especies. Muchos ecologistas consideran que la estructura y funcionalidad de los huertos se parece mucho a la de los bosques naturales (Kabir & Webb, 2009). Kumar y Nair (2004) informaron que la riqueza de especies de los huertos tropicales que van desde 27 en Sri Lanka a 602 en Java Occidental, Indonesia. Por otra parte, los huertos familiares y los SAF son refugios para muchas especies en las zonas tropicales donde la agricultura ha eliminado la cubierta de bosques. Por ejemplo, en Bangladesh, donde la cubierta forestal es menor de 10 % de la cubierta original, los huertos familiares (que son implementados en al menos 20 millones de hogares); son una fuente importante de conservación. Kabir y Webb (2009) registraron la diversidad florística y estructural de 402 huertos familiares en seis regiones de Bangladesh y encontraron 419 especies, 59 % de las cuales eran nativas, y seis especies con algún estatus de conservación prioritaria.

Las combinaciones de cultivos y arreglos espaciales de los SAF influyen la densidad y diversidad de especies

landscapes are a mosaic of forest fragments spread over pasture or crops lands; however, tree cover of these agricultural systems is abundant and with different spatial arrangements including forest patches, riparian forests, isolated trees, living fences, and windbreak tree barriers. These trees can be remnants of original forests, a result of natural regeneration, or planted by farmers (Martínez-Encino, Villanueva-López, & Casanova-Lugo, 2013; Montagnini et al., 2015).

From a biodiversity conservation point of view, AFS can provide habitat, feeding sites, perch, and biological corridors for plants and animals (Ibrahim et al., 2005). Studies have evaluated the role of trees in silvopastoral systems (a type of AFS) for fauna and flora biodiversity conservation, species population maintenance, and impact on ecological processes in agricultural landscapes (Table 4). For example, Camargo, Ibrahim, Somarriba, Finegan, and Current (2000) noted that silvopastoral systems can be structurally variable and floristically diverse depending on their origin, which can include remnants, natural regeneration, or sown. The importance of remnants depends upon their structure, composition, management, and spatial arrangement in the agricultural landscape. Enríquez-Lenis, Sáenz, & Ibrahim (2007) plant diversity and landscape heterogeneity positively affect bird richness and abundance in agricultural landscapes.

Water conservation. The environmental services provided by AFS in relation to water cycles have been insufficiently studied (Beer et al., 2003). Trees in AFS influence the water cycle by increasing water interception from rain and clouds, modifying transpiration and soil water retention, reducing runoff, and increasing soil infiltration. Bharati, Lee, Isenhardt, and Schultz (2002) reported that infiltration on land cultivated with corn or soybean, or under pastures, was five times less than under riparian furrows cultivated with a wide variety of herbaceous and tree species. This suggests that these more diversified systems can prevent runoff and the loss of nutrients.

Trees in AFS can reduce leaching losses and contamination of groundwater reserves by tannins or other environmental and human hazardous substances. As a result of reduced runoff and leaching, micro-basins with good forest or AFS cover produce high quality water (Chikowo, Mapfumo, Nyamugafata, & Giller, 2004). With conventional agricultural systems, typically less than 50 % of applied N and P is utilized by crops. In consequence, excess fertilizer moves beyond the reach of plants through runoff or leaching to deeper soil layers, contaminating groundwater reserves and decreasing water quality (Udawatta, Garrett, & Kallenbach, 2010). Therefore, agroforestry management practices can be used as a strategy to provide clean water (Shibu, 2009). For instance, in coffee production areas of Costa

de poblaciones de insectos. Brandle, Hodges, y Zhou (2004) reportaron alta densidad y diversidad de insectos en cortinas rompevientos. Esta diversidad se asocia con el perfil heterogéneo de las cortinas rompevientos que ofrece una variedad amplia de microhábitats en todas las etapas del ciclo de vida y disponibilidad de recursos, incluyendo huéspedes, presas, polen y néctar.

Los SAF proporcionan un hábitat adecuado para la vida silvestre debido a la alta complejidad de la estructura y composición del paisaje. Las cortinas rompevientos, barreras de árboles y zonas de amortiguación ribereña ofrecen un hábitat leñoso para la vida silvestre en paisajes dominados por la agricultura (Harvey et al., 2006; Harvey & González-Villalobos, 2007).

Da Silva, da Gama-Rodrigues, da Gama-Rodrigues, Machado, y Baligar (2009) compararon la distribución de comunidades de meso y macrofauna en suelos y hojarasca entre un SAF de cacao y un bosque natural en el sur de Bahía, Brasil. Los resultados sugieren que una gran diversidad de plantas en sistemas agroforestales y bosques naturales proporciona más microhábitats y heterogeneidad en la hojarasca y, por tanto, mayor biodiversidad en los suelos. Los autores concluyeron que estos SAF tienen efectos benéficos para las comunidades de fauna del suelo y que se pueden utilizar como una estrategia para su conservación.

La pérdida de hábitat y la fragmentación son las principales amenazas para la biodiversidad (Harvey et al., 2006; Harvey & González-Villalobos, 2007; Schroth et al., 2004). En América Latina, el cambio de uso de suelo de bosques naturales a pastizales ha provocado cambios en el tamaño y la distribución de los remanentes de bosques, pérdida de la biodiversidad y contaminación del agua (Harvey, Alpizar, Chacón, & Madrigal, 2005). Los paisajes remanentes son un mosaico de fragmentos de bosque que se distribuyen en pastizales o tierras de cultivo; sin embargo, la cubierta forestal de estos sistemas agrícolas es abundante y con diferentes disposiciones espaciales que incluyen parches de bosque de ribera, bosques ribereños, árboles aislados, cercos vivos y barreras de árboles rompevientos. Estos árboles pueden ser residuos de los bosques originales, resultado de la regeneración natural o plantada por agricultores (Martínez-Encino, Villanueva-López, & Casanova-Lugo, 2013; Montagnini et al., 2015).

Desde el punto de vista de la conservación de la biodiversidad, los SAF pueden proporcionar hábitat, sitios de alimentación, descanso y corredores biológicos para plantas y animales (Ibrahim et al., 2005). En los estudios se ha evaluado el papel de los árboles en los sistemas silvopastoriles (un tipo de SAF), para la conservación de la biodiversidad de flora y fauna, el mantenimiento de la población de especies y el impacto sobre los procesos ecológicos en los paisajes agrícolas

Table 4. Biodiversity in some silvopastoral systems (SPS) in the dry tropics of Latin America.

Cuadro 4. Biodiversidad en algunos sistemas silvopastoriles (SSP) en el trópico seco de América Latina.

Agroforestry systems / Sistemas agroforestales	Species / Especies	Shannon-Wiener	Forest species Reference / Especies forestales Referencia	Country / País	Source / Fuente
SPS with trees on boundaries / SSP con árboles en los límites	41 plants 17 birds 5 gastropods / 41 plantas 17 aves 5 gasterópodos	n.d.	n.d.	Choluteca, Honduras	Pérez et al. (2006)
	34 plants 30 birds 18 gastropods / 34 plantas 30 aves 18 gasterópodos	n.d.	n.d.	Rivas, Nicaragua	Pérez et al. (2006)
	31 plants 23 birds 6 gastropods / 31 plantas 23 aves 6 gasterópodos	n.d.	n.d.	Guanacaste, Costa Rica	Pérez et al. (2006)
	189 ants / 189 hormigas	1.06-1.87	131	Tabasco, México	González-Valdivia, González-Escolástico, Barba, Hernández-Daumás, and Ochoa-Gaona (2013)
	179 birds / 179 aves	3.34-3.51	490	Tabasco, México	González-Valdivia, Barba-Macías, Hernández-Daumás, and Ochoa-Gaona (2014)
SPS with scattered trees in pastures / SSP con árboles dispersos en pastos	8 plants 6 gastropods / 8 plantas 6 gasterópodos	n. d.	n. d.	Choluteca, Honduras	Pérez et al. (2006)
	2 plants 5 gastropods / 2 plantas 5 gasterópodos	n. d.	n. d.	Rivas, Nicaragua	Pérez et al. (2006)
	3 plants / 3 plantas	n. d.	n. d.	Guanacaste, Costa Rica	Pérez et al. (2006)
	178 ants / 178 hormigas	0.84-1.52	131	Tabasco, México	González-Valdivia et al. (2013)
	200 birds / 200 aves	3.20-3.51	490	Tabasco, México	González-Valdivia et al. (2014)

n.d.: not determined / n.d.: no determinado

Source: compiled by authors / Fuente: Elaboración propia

Rica where large quantities of N are applied, nitrate loss through leaching was reduced by the presence of *Eucalyptus deglupta* Blume, probably due to increased total evaporative demand and nitrate uptake during the dry season (Ávila et al., 2004).

In Brazil, Nepstad et al. (1994) observed that under extreme drought, soil water availability at 2 to 8 m was less in a degraded pasture than in the forest (310 versus 380 mm, respectively), which could be associated with greater organic matter content and ground cover in the forest. A decrease in water availability in degraded pasture soils indicates that there is less water stored in these soils than in forested soils, and consequently there is less water infiltration to the aquifer in forested soils. At the end of the dry season, the forest stored approximately 770 mm of water in the first 8 m of soil, compared with less than 400 mm in degraded pasture soils, which indicates that water scarcity can be a critical factor in arid and semiarid landscapes dominated by pastures. Studies in Costa Rica (Ríos, 2006) showed that surface runoff was significantly greater in degraded pastures (42 % of rainfall) compared with forage banks with woody perennials (3 %), secondary forests (6 %), and pastures with a high density of trees (12 %). This confirms that land use practices with high tree cover are beneficial for water capture.

Air quality conservation. Interest in AFS use as shelterbelts for improving air quality has received considerable attention (Tyndall & Colletti, 2007). Trees and shrubs employed as barriers have been utilized to reduce odor emissions, mainly in regions with a high concentration of livestock. Plant species can act as buffers by filtering particles from air currents, and removing dust, gas, and microbes (Abbasi & Khan, 2000). Strategically designed shelterbelts can be an efficient way to mitigate the problem in a socioeconomically responsible manner (Tyndall & Colletti, 2007). Nevertheless, the capacity of shelterbelts to reduce odors depends on their structure (i. e. height, length, width, and density of barrier). For instance, short shelterbelts will only intercept some of the odor that is in contact with the trees, in contrast to taller shelterbelts which have the possibility of covering a greater quantity of the odor source (Tyndall & Colletti, 2007).

Future research needs

With a growing global population, decreasing natural resources, and a changing climate, the alternatives for sustainable land use, such as AFS, not only generate the interest of academics, but also of the general public. Further research is required to accurately assess the potential of various forms of agroforestry in the tropics. For example, studies on the role of trees for biological enrichment based livestock systems in large areas of monoculture pastures, and the effect of forage

(Cuadro 4). Por ejemplo, Camargo, Ibrahim, Somarriba, Finegan, y Current (2000) observaron que los sistemas silvopastoriles pueden ser estructuralmente variables y florísticamente diversos dependiendo de su origen, el cual puede incluir residuos, regeneración natural o sembrada. La importancia de los residuos depende de su estructura, composición, manejo y disposición espacial en el paisaje agrícola. Enríquez-Lenis, Sáenz, e Ibrahim (2007) señalan que la diversidad vegetal y heterogeneidad del paisaje afectan positivamente la riqueza y abundancia de las aves en paisajes agrícolas.

Conservación del agua. Los servicios ambientales proporcionados por los SAF en relación con los ciclos del agua no se han estudiado lo suficiente (Beer et al., 2003). Los árboles en SAF influyen en el ciclo del agua mediante el aumento de la interceptación del agua de lluvia, modificando la transpiración y retención de agua, reduciendo el escurrimiento y aumentando la infiltración en suelo. Bharati, Lee, Isenhardt, y Schultz (2002) reportaron que la infiltración en tierra cultivada con maíz o soja, o en pastizales, fue cinco veces menor que en surcos de ribera cultivados con una variedad amplia de especies herbáceas y leñosas. Esto sugiere que los sistemas más diversificados pueden prevenir el escurrimiento y la pérdida de nutrientes.

Los árboles en los SAF pueden reducir pérdidas por lixiviación y contaminación de reservas de agua subterránea por taninos u otras sustancias peligrosas para el ambiente y los seres humanos. Como resultado de la reducción del escurrimiento y la lixiviación, las microcuencas con buen bosque o la cubierta de los SAF producen agua de alta calidad (Chikowo, Mapfumo, Nyamugafata, & Giller, 2004). En el caso de los sistemas agrícolas convencionales, menos de 50 % de la aplicación de N y P es utilizado por los cultivos. En consecuencia, el exceso de fertilizantes se mueve más allá del alcance de las plantas mediante el escurrimiento o lixiviación en las capas más profundas del suelo, contaminando reservas de agua subterránea y disminuyendo la calidad del agua (Udawatta, Garrett, & Kallenbach, 2010). Por lo tanto, las prácticas de manejo agroforestal se pueden utilizar como una estrategia para proporcionar agua limpia (Shibu, 2009). Por ejemplo, en las zonas de producción de café de Costa Rica, donde se aplican grandes cantidades de N, la pérdida de nitrato por lixiviación se reduce mediante la presencia de *Eucalyptus deglupta* Blume, debido probablemente al aumento de la demanda total de evaporación y a la absorción de nitrato durante la estación seca (Ávila et al., 2004).

En Brasil, Nepstad et al. (1994) observaron que bajo sequía extrema, la disponibilidad de agua, a una profundidad de 2 a 8 m, fue menor en pastura degradada (310 mm) que en el bosque (380 mm), lo que podría estar asociado con un mayor contenido de materia orgánica y cubierta del suelo en el bosque. Una

diversity on reducing ruminant methane emissions under grazing conditions are needed. In addition, further studies are required to assess the short-, medium- and long-term economic viability of these systems. To overcome these and other limitations, much more basic and applied research is required to help elucidate the elementary processes that drive or limit the use of agroforestry systems. In particular, it is necessary to investigate the interactions between the various components of the system, which are the basis for the design, evaluation and management of AFS.

Conclusions

For many years, people have given little attention to the generation of environmental services and the conservation of natural resources. Today, there is an urgent need to re-define all anthropogenic activities to make them less harmful to the environment. Tools and strategies are available to producers to allow them to play an important role in the conservation and management of agro-ecosystems and to provide environmental services. In the current review, the examples suggest that AFS play an important role in carbon sequestration, greenhouse gases mitigation and improving soil physicochemical characteristics. In addition, AFS contribute to biodiversity conservation, increasing species richness, abundance, and diversity, compared to conventional agricultural systems. They support water conservation and availability by reducing runoff and water pollution, and air quality by reducing odors from livestock facilities. Nevertheless, it is important to recognize that the issue of environmental services is a relatively recent field for formal investigation. Thus, further studies are needed to increase our understanding of the processes and bio-physical interactions, and to develop optimal management under different scenarios.

Acknowledgments

We are grateful to PhD Judith Coromoto Petit-Aldana for critical comments on drafts of the manuscript. Also, the first author is thankful to the National Council of Science and Technology (CONACYT) for the PhD scholarship.

End of English version

References / Referencias

- Abbasi, S. A., & Khan, F. I. (2000). Greenbelts for pollution abatement: Concepts, design, applications. New Delhi, India: Discovery Publishing House.
- Abdalla, A. L., Godoy, P. B., Longo, C., Araujo-Neto, J. C., Peçanha, M. R. S., Bueno, I. C. S.,...Sallam, S. M. A.

disminución en la disponibilidad de agua en suelos de pastos degradados indica que hay menos agua almacenada que en los suelos de los bosques y, por lo tanto, hay menos infiltración de agua al acuífero en suelos forestales. Al final de la estación seca, el bosque almacena aproximadamente 770 mm de agua en los primeros 8 m del suelo, en comparación con menos de 400 mm en suelos de pastos degradados, lo que indica que la escasez de agua puede ser un factor crítico en paisajes áridos y semiáridos dominados por pastos.

Un estudio realizado en Costa Rica (Ríos, 2006) mostró que el escurrimiento superficial fue significativamente mayor en pastos degradados (42 % de la precipitación) en comparación con los bancos de forraje con especies leñosas perennes (3 %), bosques secundarios (6 %) y pastos con alta densidad de árboles (12 %). Esto confirma que las prácticas de uso de suelo con alta cobertura arbórea son beneficiosas para la captura de agua.

Conservación de la calidad del aire. El interés en el uso de los SAF ha recibido atención considerable, como es el caso de las barreras protectoras para mejorar la calidad del aire (Tyndall & Colletti, 2007). Los árboles y arbustos utilizados como barreras se han empleado para reducir emisiones de olores, sobre todo en regiones con alta concentración de ganado. Las especies vegetales pueden actuar como búferes al filtrar las partículas de las corrientes de aire y remover polvo, gas y microbios (Abbasi & Khan, 2000). Las barreras protectoras diseñadas estratégicamente pueden ser una forma eficaz para mitigar el problema de los olores de una manera socioeconómicamente responsable (Tyndall & Colletti, 2007); sin embargo, la capacidad de las barreras depende de su estructura (es decir, altura, longitud, amplitud y densidad de la barrera). Por ejemplo, aquellas que son pequeñas solo interceptan poco olor del que está en contacto con los árboles, mientras que las barreras altas tienen la posibilidad de cubrir mayor cantidad de olores (Tyndall & Colletti, 2007).

Necesidades futuras de investigación

Con un clima cambiante y una población mundial creciente que disminuye los recursos naturales, las alternativas para el uso sostenible del suelo, tales como los SAF, no solo generan el interés de académicos, sino también del público en general. Hace falta más investigación para evaluar con precisión el potencial de diversas formas de la agroforestería en trópicos. Por ejemplo, se requieren estudios sobre el papel de los árboles en el enriquecimiento biológico basado en sistemas ganaderos en grandes áreas de pastos de monocultivos; y sobre el efecto de la diversidad de forraje en la reducción de emisiones de metano de rumiantes en pastoreo. Además, se requieren más estudios para evaluar la viabilidad económica de estos

- (2007). Methane emission, protozoa and methanogen counts in sheep fed coconut oil of a Brazilian tannin-rich plant (*Mimosa casealpinaefolia*). *Microbial Ecology in Health and Disease*, 19, 33.
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99, 15–27. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- Allen, S., Shibu, J., Nair, P. K. R., Brecke, B. J., Nkedi-Kizza, P., & Ramsey, C. (2004). Safety net role of tree roots: Experimental evidence from an alley cropping system. *Forest Ecology and Management*, 192, 395–407. doi:10.1016/j.foreco.2004.02.009
- Anguiano, J. M., Aguirre, J., & Palma, J. M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(1), 149–160. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83725698009>
- Ávila, H., Harmand, J. M., Dambrine, E., Jiménez, F., Beer, J., & Oliver, R. (2004). Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la zona Sur de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 41, 83–91
- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10(38), 80–87. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228916276_Servicios_ambientales_de_los_sistemas_agroforestales
- Berra, G., Finster, L., & Valtorta, S. E. (2009). Una técnica sencilla para la medición de emisiones de metano entérico en vacas. *Ciencias Veterinarias*, 8, 49–56. doi: 10.14409/favecv.v8i1.1479
- Bharati, L., Lee, K. H., Isenhardt, T. M., & Schultz, R. C. (2002). Soil-water infiltration under crops, pasture and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems*, 56, 249–257. doi: 10.1023/A:1021344807285
- Brandle, J. R., Hodges, L., & Zhou, X. (2004). Windbreaks in sustainable agriculture. *Agroforestry Systems*, 61, 65–78. doi: 10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62
- Camargo, J. C., Ibrahim, M., Somarriba, E., Finegan, B., & Current, D. (2000). Factores ecológicos y socioeconómicos que influyen en la regeneración natural del laurel en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo y subhúmedo de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 7(26), 46–52.
- Casanova-Lugo, F., Caamal-Maldonado, J., Petit-Aldana, J., Solorio-Sánchez, F., & Castillo-Caamal, J. (2010). Acumulación de carbono en la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 45–50. Retrieved from <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/31644>
- Chikowo, R., Mapfumo, P., Nyamugafata, P., & Giller, K. E. (2004). Mineral N dynamics, leaching and sistemas a corto, mediano y largo plazo. Para superar éstas y otras limitaciones, son necesarios muchos más estudios básicos y aplicados para ayudar a dilucidar los procesos elementales que impulsan o limitan el uso de los SAF. En particular, es preciso investigar las interacciones entre los diversos componentes del sistema, que son la base para el diseño, evaluación y manejo de los SAF.

Conclusiones

Durante muchos años, la gente ha prestado poca atención a la generación de servicios ambientales y conservación de recursos naturales. Hoy en día, existe una necesidad urgente de redefinir todas las actividades antropogénicas para hacerlas menos perjudiciales para el medio ambiente. Las herramientas y estrategias están al alcance de los productores para que puedan desempeñar un papel importante en la conservación y manejo de los ecosistemas agrícolas y proporcionar servicios ambientales. En la revisión actual, los ejemplos sugieren que los SAF juegan un papel importante en la captura de carbono, mitigación de gases de efecto invernadero y mejora de características fisicoquímicas del suelo. Además, los SAF contribuyen a la conservación de la biodiversidad, aumentando la riqueza, abundancia y diversidad de especies, en comparación con los sistemas agrícolas convencionales; apoya la conservación y disponibilidad del agua mediante la reducción de escurrimiento y contaminación; y mejora la calidad del aire mediante la reducción de olores provenientes de las instalaciones ganaderas. No obstante, es importante reconocer que el tema de los servicios ambientales es un campo relativamente reciente en la investigación formal; por lo tanto, se requiere mayor investigación para aumentar la comprensión de los procesos e interacciones biofísicas y desarrollar un manejo óptimo en diferentes escenarios.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la PhD Judith Coromoto Petit-Aldana, por sus comentarios críticos en los borradores del manuscrito. Asimismo, el primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de doctorado.

Fin de la versión en español

- nitrous oxide losses under maize following two-year improved fallows on a sandy loam soil in Zimbabwe. *Plant and Soil*, 259(1-2), 315–330. doi: 10.1023/B:PLSO.0000020977.28048.f0
- Da Silva Moço, M. K., da Gama-Rodrigues, E. F., da Gama-Rodrigues, A. C., Machado, R. C. R., & Baligar, V. C. (2009). Soil and litter fauna of cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 76(1), 127–138. doi: 10.1007/s10457-008-9178-6
- Dias-Moreira, G., Tavares-Lima, P., Oliveira-Borge, B., Primavesi, O., Longo, C., McManu, C., ... Louvandini, H. (2013). Tropical tanniniferous legumes used as an option to mitigate sheep enteric methane emission. *Tropical Animal Health and Production*, 45, 879–882. doi: 10.1007/s11250-012-0284-0
- Dixon, R. K. (1995). Agroforestry system: Sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*, 31, 99–116. doi: 10.1007/BF00711719
- Eckard, R. J., Grianger, C., & de Klein, C. A. M. (2010). Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science*, 130, 47–56. doi:10.1016/j.livsci.2010.02.010
- Enríquez-Lenis, M. L., Sáenz, J. C., & Ibrahim, M. (2007). Riqueza, abundancia y diversidad de aves y su relación con la cobertura arbórea en un agropaisaje dominado por la ganadería en el trópico subhúmedo de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 45, 49–57.
- Ferrer, G. J., López, H. P., Pinto, L. S., Toral, J. N., López, L. H., & Carmona, J. (2007). Livestock, nutritive value and local knowledge of fodder trees in fragment landscapes in Chiapas, Mexico. *Interciencia*, 32(4), 274–280. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33932412>
- Ganry, F., Feller, C., Harmand, J. M., & Guibert, H. (2001). Management of soil organic matter in semiarid Africa for annual cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 105–118. doi: 10.1023/A:1013320800721
- Garrett, H. E. (2009). *North American agroforestry: An integrated science and practice* (2nd. ed.). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Inc.
- González-Valdivia, N., Barba-Macías, E., Hernández-Daumás, S., & Ochoa-Gaona, S. (2014). Avifauna in silvopastoral systems in the Mesoamerican Biological Corridor, Tabasco, México. *International Journal of Tropical Biology and Conservation*, 62(3), 1031–1052. doi: 10.15517/rbt.v62i3.11442
- González-Valdivia, N., González-Escolástico, G., Barba, E., Hernández-Daumás, S., & Ochoa-Gaona, S. (2013). Mirmecofauna associated with agroforestry systems in the Mesoamerican Biological Corridor in Tabasco, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 306–317. Retrieved from <http://www.revistas.unam.mx/index.php/bio/article/view/30996>
- Harmand, J. M., & Balle, P. (2001). La jachère agroforestière (arborée ou arbustive) en Afrique tropicale. In C. Floret, & R. Pontanier (Eds.), *La jachère en Afrique tropicale: Rôles, aménagement, alternatives. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances* (pp. 265–292). Paris, France: John Libbey Eurotext.
- Harvey, C. A., & González-Villalobos, J. A. (2007). Agroforestry systems conserve species-rich but modified assemblages of tropical birds and bats. *Biodiversity and Conservation*, 16, 2257–2292. doi: 10.1007/s10531-007-9194-2
- Harvey, C. A., Alpízar, F., Chacón, M., & Madrigal, R. (2005). *Assessing linkages between agriculture and biodiversity in Central America: Historical overview and future perspectives*. San José, Costa Rica: Mesoamerican and Caribbean Region-Conservation Science Program-The Nature Conservancy (TNC).
- Harvey, C. A., González, J. G., & Somarriba, E. (2006). Dung beetle and terrestrial mammal diversity in forest, indigenous agroforestry systems and plantain monocultures in Talamanca, Costa Rica. *Biodiversity and Conservation*, 15, 555–585. doi: 10.1007/s10531-005-2088-2
- Hess, H. D., Beuret, R. A., Loetscher, M., Hindrichsen, I. K., Machmüller, A., Carulla, J. E., ... Kreuzer, M. (2004). Ruminant fermentation, methanogenesis and nitrogen utilization of sheep receiving tropical grass hay-concentrate diets offered with *Sapindus saponaria* fruits and *Cratylia argentea* foliage. *Animal Science*, 79, 177–189.
- Ibrahim, M., Villanueva, C., & Mora, J. (2005). Traditional and improved silvopastoral systems and their importance in sustainability of livestock farms. In M. R. Mosquera-Losada, J. McAdam, & A. Rigueiro-Rodríguez (Eds.), *Silvopastoralism and sustainable land management* (pp. 13–18). UK: CABI Publishing. doi: 10.1079/9781845930011.0013
- Kabir, E. M., & Webb, E. L. (2009). Can homegardens conserve biodiversity in Bangladesh? *Biotropica*, 40, 95–103. doi: 10.1111/j.1744-7429.2007.00346.x
- Kumar, B. M., & Nair, P. K. R. (2004). *Tropical homegardens: A time tested example of sustainable agroforestry*. Advances in agroforestry (vol. 3). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Martínez-Encino, C., Villanueva-López, G., & Casanova-Lugo, F. (2013). Densidad y composición de árboles dispersos en potreros en la Sierra de Tabasco, México. *Agrociencia*, 47(5), 483–496. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2013/jul-ago/art-6.pdf>
- McNeely, J. A. (2004). Nature vs nurture: Managing relationships between forests, agroforestry and wild biodiversity. *Agroforestry Systems*, 61, 155–165. doi: 10.1007/978-94-017-2424-1_11
- Montagnini, F. (2006). *Environmental services of agroforestry systems*. USA: Food Products Press.
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Cali, Colombia: Fundación CIPAV.
- Nair, P. K. R., Gordon, A. M., & Mosquera-Losada, M. R. (2008). Agroforestry. In S. E. Jorgensen, & B. D. Fath (Eds.), *Ecological engineering. Encyclopedia of ecology* (pp. 101–110). Oxford, UK: Elsevier.

- Nair, P. K. R., 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
- Nepstad, D., de Carvalho, C., Davidson, E., Jipp, P., Lefebvre, P., Negreiros, ...& Vieira, S. (1994). The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 372, 666–669. doi: 10.1038/372666a0
- Palm, C. A., van Noordwijk, M., Woormer, L., Alegre, J., Arévalo, L., Castilla, C., ...Sitompul, M. (2005). Carbon losses and sequestration following land use change in the humid tropics. In C. A. Palm, S. A. Vosti, P. A. Sanchez, & P. J. Ericksen (Eds). *Alternatives to slash and burn: The search for alternatives* (41–63). New York, USA: Columbia University Press.
- Pandey, D. K. (2002). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*, 2(4), 367–377. doi: 10.3763/cpol.2002.0240
- Pérez, A. M., Sotelo, M., Ramírez, F., Ramírez, I., López, A., & Siria, I. (2006). Conservación de la biodiversidad en sistemas silvopastoriles de Matiguás y Rio Blanco (Matagalpa, Nicaragua). *Revista Ecosistemas*, 15(3), 125–141. Retrieved from <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/497>
- Petit, A. J., Casanova, L. F., & Solorio, S. F. (2009). Asociación de especies arbóreas forrajeras para mejorar la productividad y el reciclaje de nutrimentos. *Agricultura Técnica en México*, 35(1), 113–122. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100011
- Petit-Aldana, J., Uribe-Valle, G., Casanova-Lugo, F., Solorio-Sánchez, J., & Ramírez-Avilés, L. (2012). Descomposición y liberación de nitrógeno y materia orgánica en hojas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Guazuma ulmifolia* Lam. y *Moringa oleifera* Lam. en un banco mixto de forraje. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 5–25. doi: 10.5154/rchscfa.2011.03.025
- Pinares-Patiño, C. S., Muetzel, S., Molnaro, G., Hunt, C., & Clark, H. (2010). Emissions of hydrogen gas from sheep fed fresh perennial ryegrass and pelleted diets. In M. G. Crovetto (Ed.), *Energy and protein metabolism and nutrition* (pp. 447–448). Parma, Italy: Wageningen Academic publishers.
- Ríos, N., Cárdenas, A. Y., Andrade, H. J., Ibrahim, M., Jiménez, F., Sancho, F., ...Woo, A. (2006). Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 45, 66–71. Retrieved from <http://www.sidalc.net/repdoc/A6009e/A6009e.pdf>
- Roncal-García, S., Soto-Pinto, L., Castellanos-Albores, J., Ramírez-Marcial, N., & de Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(3), 200–206. Retrieved from <http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v33n3/art09.pdf>
- Sanginga, N., Dashiell, K. E., Diels, J., Vanlauwe, B., Lyasse, O., Carsky, R. J., ...Ortiz R. (2003). Sustainable resource management coupled to resilient germplasm to provide new intensive cereal-grain-legume-livestock systems in the dry savanna. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100, 305–314. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00188-9
- Schroth, G., & Sinclair, F. (2003). *Trees crops and soil fertility: Concepts and research methods*. Wallingford, UK: CABI.
- Schroth, G., da Fonseca, G. A., Harvey, C. A., Gascon, C., Vasconcelos, H., & Izac, A. N. (2004). *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Washington, DC, USA: Island Press.
- Shibu, J. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1–10. doi: 10.1007/s10457-009-9229-7
- Silivong, P., Xaykham, O., Aloun, O., & Preston, T. R. (2012). Effect of potassium nitrate and urea on feed intake, digestibility, N balance and methane production of goats fed a basal diet of *Gliricidia* (*Gliricidia sepium*) and *Mimosa* (*Mimosa pigra*) foliages supplemented with molasses. *Livestock Research for Rural Development*, 24, article 138. Retrieved April 24, 2016 from <http://www.lrrd.org/lrrd24/8/phon24138.htm>
- 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
- Tyndall, J., & Colletti, E. J. (2007). Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: A review. *Agroforestry Systems*, 69, 45–65. doi: 10.1007/s10457-006-9017-6
- Udawatta, R. P., Garrett, H. E., & Kallenbach, R. L. (2010). Agroforestry and grass buffer effects on water quality in grazed pastures. *Agroforestry systems*, 79(1), 81–87. doi: 10.1007/s10457-010-9288-9
- Uribe, V. G., & Petit, A. J. (2007). Contribución de los barbechos cortos a la recuperación de la fertilidad del suelo en milpas del estado de Yucatán, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2), 137–142. Retrieved from http://www.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id_revista_numero=36