

Servicios ambientales de los sistemas agroforestales¹

John Beer²; Celia Harvey²; Muhammad Ibrahim²; Jean Michel Harmand²; Eduardo Somarriba²; Francisco Jiménez²

Palabras claves: Biodiversidad; cacao; café; calidad del agua; captura de carbono; conservación del suelo; sistemas ganaderos sostenibles.

Environmental services of agroforestry systems

RESUMEN

Este artículo resume los principales servicios ambientales que pueden proveer los sistemas agroforestales (SAF): 1) mantenimiento de la fertilidad del suelo/reducción de la erosión mediante el aporte de material orgánico al suelo, fijación de nitrógeno y reciclaje de nutrientes; 2) conservación del agua (cantidad y calidad) al favorecer la infiltración y reducir la escorrentía superficial que podría contaminar cursos de agua; 3) captura de carbono, enfatizando el potencial de los sistemas silvopastoriles; y 4) conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados. Estos servicios complementan los productos que los SAF proveen (para uso comercial o familiar; p. ej., leña, madera, frutos) pero rara vez los agricultores son recompensados por ellos. Se necesita más investigación sobre posibles interrelaciones (incompatibilidades) entre los diferentes servicios y los posibles efectos negativos en el rendimiento productivo de los SAF cuando se aumenta el componente arbóreo de los sistemas agrícolas; p. ej., potenciar al máximo la captura de carbono con monocultivos de alta densidad arbórea tendrá efectos negativos sobre la conservación de la biodiversidad y podría eliminar la fuente de suplementos alimenticios, fibras, medicinas, etc. usadas por familias rurales. También se deben desarrollar y probar, en diferentes escenarios socioeconómicos, métodos para el manejo de incentivos financieros en la adopción/mejoramiento de los SAF para favorecer un mejor uso de la tierra. Una limitación fundamental de la promoción de los SAF es la escasez de análisis económicos que incluya la valoración de estos servicios.

ABSTRACT

This article presents a brief review of the main environmental service functions that are provided by agroforestry systems (AFS): 1) maintenance of soil fertility/reducing erosion via organic matter inputs to the soil, nitrogen fixation and nutrient recycling; 2) conservation of water (quantity and quality) via greater infiltration and reduced surface runoff that could contaminate water courses; 3) carbon capture, emphasizing the potential of silvopastoral systems; and 4) biodiversity conservation in fragmented landscapes. These service functions complement the products that AFS provide (for commercial and home use; e.g. fuelwood, timber, fruits) but farmers are rarely rewarded for them. More research is needed on the possible trade-offs between the different service functions and the negative effects on the traditional products/uses of AFS when the tree component of agricultural systems is increased; e.g. maximizing carbon capture with high-density tree monocultures will have negative effects on biodiversity conservation and could eliminate the source of food supplements, fibres, medicines, etc. used by rural families. Methods for managing financial incentives, as rewards to farmers who provide these services by adopting/improving AFS, in order to leverage better land use, also have to be developed and tested in different socio-economic frameworks. A major limitation to the promotion of AFS is the dearth of economic analyses that include valuation of these service functions.

INTRODUCCIÓN

El estudio formal y la promoción de los Sistemas Agroforestales (SAF), un sistema de uso de la tierra practicado desde tiempos inmemorables tanto en el 'viejo' como en el 'nuevo' mundo (ver referencias de escritores del griego antiguo y otros escritores en Robinson 1985), comenzó a finales de los años 70 (De las Salas 1970; Steppeler y Nair 1987). Inicialmente el enfoque fue sobre

la descripción, posibles ventajas/desventajas biológicas y socioeconómicas y el inventario de SAF tradicionales, generalmente en el trópico (Budowski 1982; Nair 1989). Esto fue seguido por evaluaciones de la productividad de los SAF ya existentes, y más recientemente, de novedosos estudios sobre las interacciones entre las especies componentes, con miras a mejorar el manejo y la rentabilidad (o

¹ Basado en: Beer J; Harvey CA; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba E; Jiménez, F 2003 Service functions of agroforestry systems. In XII World forestry congress; forest source of life (2003 Quebec Canada) Proceedings Quebec Canada B Forest for the planet p 417 - 424 Traducido al español por Patricia Hernández, CATIE, Turrialba Costa Rica

² Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Turrialba Costa Rica E-mail: jbeer@catie.ac.cr (autor para correspondencia) charvey@catie.ac.cr; mibrahim@catie.ac.cr; harmad@catie.ac.cr; esomarri@catie.ac.cr; fjimenez@catie.ac.cr

reducir el riesgo) (Schroth y Sinclair 2003). A finales de los años 90, la creciente preocupación internacional sobre los temas ambientales conllevó a nuevos tratados (p. ej., Protocolo de Kyoto, con énfasis en servicios ambientales de usos de tierra alternativos). Rápidamente se reconoció que los SAF poseen muchas ventajas sobre los monocultivos para responder a la demanda de una agricultura multifuncional y que proveen servicios medioambientales importantes, valores estéticos (p. ej., parques en ciudades y sabanas con árboles), amortigua áreas protegidas y podrían utilizarse para turismo agroecológico (p. ej., paseos guiados en SAF de cacao en zonas indígenas de Costa Rica y Belice).

El pago de incentivos a los agricultores cuyos usos de tierra protegen los recursos naturales y así proveen un servicio a la comunidad local, nacional y mundial, es una nueva opción que podría mejorar la viabilidad financiera de las fincas. Es oportuno enfatizar y revisar la cantidad y valor de los servicios ambientales que prestan los SAF. Los servicios principales de los SAF considerados en este documento son la conservación del suelo, conservación de la calidad del agua, captura de C (cambio climático) y conservación de la biodiversidad.

¿Cómo pueden los SAF reducir la erosión y mantener la fertilidad del suelo?

Los conceptos de protección y mejoramiento de suelos por los árboles en SAF han sido revisados por Young (1989) y Buresh y Tian (1998), entre otros autores. El mejoramiento del suelo en SAF está vinculado al crecimiento de los árboles fijadores de N o de árboles/arbustos de raíces profundas que aumentan la disponibilidad de los nutrientes a través de la fijación biológica, reciclaje de nutrientes desde capas profundas hacia la superficie del suelo (especialmente en zonas secas) y acumulación de materia orgánica en el suelo (Beer 1988; Rao *et al* 1998).

La investigación de SAF (especialmente en África) inicialmente se enfocó en las formas de mantener la fertilidad del suelo en sistemas de cultivos anuales al usar especies de arbustos leguminosos; p. ej., los SAF en zonas de sabana (Charreau y Vidal 1965), cultivos en callejones (Kang y Reynolds 1989) y barbechos mejorados con árboles (ver abajo). Aunque muchos de estos estudios agroforestales mejoraron la productividad y la fertilidad del suelo en las estaciones experimentales o en estudios en fincas manejados por los investigadores, la adopción de sistemas de cultivo en callejones por los productores fue decepcionante debido a la alta necesidad de mano de

obra, la falta de mercado o uso familiar de los productos provenientes de los árboles/arbustos y el largo tiempo requerido para mostrar cambios positivos (Carter 1995). El uso de franjas de pasto y otras especies anuales para atrapar sedimentos y nutrientes, disminuir la escorrentía e incrementar la infiltración, ha sido promovido ampliamente por organizaciones no gubernamentales en América Central y Asia, pero se ha estudiado poco el efecto de "barreras agroforestales" (cultivos en callejones de contorno) sobre el escurrimiento y la erosión.

En áreas donde se practica la tumba y quema con ciclos cortos, los barbechos de árboles plantados pueden evitar la pérdida de la fertilidad del suelo (Anderson y Sinclair 1993; Harmand y Njiti 1998; Ganry *et al* 2001). La disponibilidad del N, determinada por el contenido de N inorgánico del suelo, la mineralización aeróbica de N entre 0 - 20 cm de profundidad y el N fijado en la biomasa, puede ser significativamente más alta después de una rotación de árboles fijadores de N que después de barbechos con otras especies de árboles y/o pastos (Harmand y Balle 2001). En barbechos herbáceos (leguminosas o no leguminosas), la mayor acumulación de material orgánico, el almacenamiento de nutrientes en la biomasa, la mayor densidad y distribución vertical de las raíces ayudan a mantener las reservas de nutrientes al reducir la lixiviación y/o al "bombear" nutrientes hacia la superficie del suelo de las capas más profundas. Szott y Palm (1996) reportaron que, en comparación con barbechos herbáceos leguminosos, los barbechos de árboles leguminosos incrementaron la cantidad del mantillo, los cationes intercambiables y el P disponible en el suelo (0-45 cm); y el total de las reservas de P, K, Ca y Mg en la biomasa. Estos autores sugirieron que los árboles leguminosos de rápido crecimiento pueden acelerar la restauración de las reservas de N, P y K en la capa superior del suelo donde pueden ser aprovechados por el cultivo, pero no reponen completamente las reservas de Ca y Mg.

Los árboles de sombra en cultivos perennes (p. ej., café y cacao) aportan hojarasca y residuos de podas que cubren el suelo, reduce el impacto de las gotas de la lluvia, la velocidad de escorrentía y la erosión, mejoran la estructura, el contenido de N y la retención de nutrientes en el suelo (Fassbender *et al* 1991; Beer *et al* 1998).

Los escasos análisis económicos de los SAF mencionados arriba (p. ej., Sullivan *et al* 1992) no toman en cuenta todos

los beneficios a corto y largo plazo que resultan de incluir árboles (por ejemplo, la mejora o el mantenimiento de la fertilidad del suelo) ni han evaluado el posible impacto de los incentivos por servicios ambientales sobre la rentabilidad del sistema.

¿Cómo pueden los SAF contribuir a mantener la cantidad y calidad del agua?

El potencial de los SAF para asegurar el suministro de agua (cantidad y calidad) es el servicio ambiental menos estudiado. Los árboles en los SAF influyen en el ciclo del agua al incrementar la intercepción de la lluvia y de nubes (goteo debido a la condensación al chocar las nubes con la vegetación) y al modificar la transpiración y la retención del agua en el suelo, reduciendo así la escorrentía e incrementando la infiltración. Por ejemplo, Bharati *et al* (2002) reportaron que la infiltración en áreas cultivadas con maíz o soya, o bajo pasturas, fue cinco veces menor que bajo franjas riparias cultivadas con una variedad de plantas y especies arbóreas, sugiriendo que el último parece tener mayor potencial para prevenir que la escorrentía superficial (conteniendo sustancias contaminantes) llegue a los cursos de agua. Más aún, los árboles en los SAF pueden reciclar los nutrientes en forma conservadora previniendo su pérdida por lixiviación (Imbach *et al* 1989), reduciendo así la contaminación de las aguas freáticas por nitratos u otras sustancias dañinas para el ambiente y la salud humana. Como resultado de menor escorrentía y lixiviación, las microcuencas con buena cobertura del suelo (forestal o de SAF) producen agua de alta calidad (Stadtmüller 1994).

Estudios en Costa Rica han ilustrado los efectos de los SAF sobre el ciclo hidrológico y sugerido avenidas para manipularlos. Por ejemplo, la intercepción de lluvia fue de 16 y 7,5% en plantaciones de café asociadas con *Erythrina poeppigiana* podada periódicamente (555 árboles ha⁻¹) o *Cordia alliodora* sin podar (135 árboles ha⁻¹), respectivamente (Jiménez 1986). En áreas de producción de café donde se aplican grandes cantidades de N en los fertilizantes químicos, las pérdidas de nitratos por lixiviación fueron más altas en plantaciones de café sin sombra que en cafetales con árboles de sombra (Babbar y Zak 1995), probablemente debido a las mayores tasas de transpiración en los cafetales con árboles (Ávila 2003). En Costa Rica, la legislación reconoce los servicios ambientales de bosques y SAF, pero se necesitan los análisis económicos que tomen en cuenta los beneficios ambientales a mediano y largo plazo para determinar el verdadero valor de los SAF.

¿Cómo pueden los SAF secuestrar carbono y reducir las emisiones de gases de invernadero?

Los SAF de altos rendimientos pueden jugar un papel importante en el secuestro de C en suelos y biomasa leñosa (sobre y bajo suelo). Por ejemplo, en América Latina, el manejo ganadero tradicional involucra monocultivos de pastos, los cuales se degradan aproximadamente cinco años después de ser establecidos, liberando cantidades significativas de C a la atmósfera. Veldkamp (1994) estimó que la liberación neta acumulada de CO₂ de pasturas de baja productividad (*Axonopus compressus*) varió de 31,5 (suelo Humitropept) a 60,5 Mg C ha⁻¹ (Hapludand) en los primeros 20 años después de eliminar el bosque. Los sistemas silvopastoriles bien manejados pueden mejorar la productividad total (Bustamante *et al* 1998; Bolívar *et al* 1999), además de secuestrar C (Andrade 1999; López *et al* 1999), dando un beneficio económico adicional para los ganaderos. El total del C en los sistemas silvopastoriles varió entre 68-204 t C ha⁻¹, con la mayoría del C almacenado en el suelo, mientras que los incrementos anuales de C variaron entre 1,8 a 5,2 t C ha⁻¹ (Cuadro 1).

La cantidad de C fijado en los sistemas silvopastoriles es afectado por la(s) especie(s) de árbol/arbusto, la densidad y distribución espacial de los árboles, y la tolerancia de las especies herbáceas a la sombra (Nyberg y Hogberg 1995; Jackson y Ash 1998). En las pendientes de los Andes Ecuatorianos, el total del C en el suelo aumentó de 7,9% bajo pastura de *Setaria sphacelata* sin sombra, a 11,4% bajo *S. sphacelata* con sombra de *Inga* spp. pero no se observaron diferencias bajo *Psidium guajava*. Los suelos bajo *Inga* conservaron 20 t C ha⁻¹ más en los 15 cm superiores que la pastura abierta (Rhoades *et al* 1998).

Pocos estudios se han realizado para determinar cómo los pagos por el secuestro de C afectarán el ingreso de la finca y los cambios en el uso de la tierra (Ruiz 2002). Un análisis *ex ante* mostró que los ganaderos pueden incrementar sus ingresos más de un 10% cuando el 20% de las pasturas de monocultivos es transformado en sistemas silvopastoriles (p. ej., bancos de forraje y árboles dispersos en pasturas) y en bosque secundario. Este análisis económico, realizado en fincas ganaderas de doble propósito, sugiere que el ingreso potencial neto generado por el C almacenado en los troncos de los árboles de una finca de 70 ha fue de US\$253 año⁻¹ (precio del C de US\$7 t⁻¹; Pomareda 1999).

Cuadro 1. Almacenamiento y fijación de carbono en pasturas y sistemas silvopastoriles

Zona Sistema (edad en años)	C en el suelo ¹ (t ha ⁻¹)	C sobre el nivel del suelo ² (t ha ⁻¹)	Total de C (t ha ⁻¹)	Fijación de C ³ (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Referencia
Tierras bajas húmedas, Región Norte, Costa Rica					López <i>et al</i> 1999
<i>Panicum maximum</i> (monocultivo)	233 : 8		233		
<i>P. maximum</i> - <i>Cordia alliodora</i> (±3)	177 : 8	2,3	179		
<i>P. maximum</i> - <i>C. alliodora</i> (3-7)	196 : 21	8,8	205		
<i>P. maximum</i> - <i>C. alliodora</i> (±7)	175 : 23	26,8	202		
Ecosistemas de baja montaña, Andes Ecuatorianos					Rhoades <i>et al</i> 1998
<i>Setaria sphacelata</i> (pastura)	69				
<i>S. sphacelata</i> - <i>Inga</i> sp.	87				
<i>S. sphacelata</i> - <i>Psidium guajava</i>	74				
Tierras bajas húmedas, Zona Atlántica, Costa Rica					Andrade 1999
<i>Brachiaria brizantha</i> - <i>Eucalyptus deglupta</i> (2)		3,7		1,8	
<i>B. decumbens</i> - <i>E. deglupta</i> (2)		3,8		1,9	
<i>P. maximum</i> - <i>E. deglupta</i> (2)		4,7		2,3	
<i>B. brizantha</i> - <i>Acacia mangium</i> (2)		3,9		1,9	
<i>B. decumbens</i> - <i>A. mangium</i> (2)		3,9		1,9	
<i>P. maximum</i> - <i>A. mangium</i> (2)		4,2		2,1	
Tierras bajas húmedas, Zona Atlántica, Costa Rica					Ávila 2000
<i>B. brizantha</i> - <i>A. mangium</i> (3)	87 : 18	8,90 : 0,03	96	2,2	
<i>B. brizantha</i> - <i>E. deglupta</i> (3)	87 : 1	7,48 : 0,26	95	1,8	
<i>B. brizantha</i> (monocultivo)	66 : 16	2,04 : 0,16	68		
<i>Ischaemum indicum</i> (monocultivo)	84 : 11	0,12 : 0,03	84		
Tierras altas, Cordillera Volcánica, Costa Rica					Mora 2001
<i>Pennisetum clandestinum</i> (monocultivo)	494 : 35			5,16 : 0,30	
<i>P. clandestinum</i> y árboles	573 : 30			5,14 : 0,25	
<i>Cynodon nlemfuensis</i> (monocultivo)	756 : 54			4,79 : 0,18	
<i>C. nlemfuensis</i> y árboles	624 : 65			4,91 : 0,04	
Jhansi, India					Rai <i>et al</i> 2001
Pastura mixta ⁴	0,47				
Pastura mixta - <i>Acacia nilotica</i> var <i>Cupressiformis</i>	0,67 : 0,04				
Pastura mixta - <i>Dalbergia sissoo</i>	0,71 : 0,04				
Pastura mixta - <i>Hardwickia binata</i>	0,71 : 0,05				
Tierras altas, Cordillera Volcánica, Costa Rica					Villanueva 2001
<i>P. clandestinum</i> (monocultivo)	185 : 32		185		
<i>P. clandestinum</i> - <i>Alnus acuminata</i> (2)	187 : 46	1,1 : 0,6	188		
<i>P. clandestinum</i> - <i>A. acuminata</i> (3)	196 : 25	4,2 : 1,7	200		
<i>P. clandestinum</i> - <i>A. acuminata</i> (4)	197 : 9	6,2 : 0,8	203		
Laderas estacionalmente secas, Nicaragua Central					Ruiz 2002
Monocultivo de pasto naturalizado	150 : 15	1,4 : 0,2	151 : 16		
Pastos naturalizados y árboles	155 : 13	9 : 2,7	164 : 14		
Monocultivo de pastos mejorados	158 : 15	1,6 : 0,2	159 : 16		
Pastos mejorados y árboles	155 : 15	15 : 3,0	170 : 16		

¹ Los valores de C en el suelo corresponden a las siguientes profundidades del suelo (cm): 0-50 (López *et al* 1999), 0-15 (Rhoades *et al* 1998) 0-30 (Ávila 2000) 0-100 (Mora 2001) 0-60 (Villanueva 2001) y 0-80 (Ruiz 2002).

² Los valores de C sobre el suelo fueron estimados solamente por el C almacenado en árboles (López *et al* 1999; Villanueva 2001) o en árboles y pasturas (Andrade 1999; Ávila 2000; Ruiz 2002)

³ Los valores de fijación de C corresponden al C fijado en la biomasa de los árboles (Ávila 2000) y en suelos (Mora 2001).

⁴ La pastura consistió de *Chrysopogon fulvus*, *Stylosanthes hamaca* y *S. scabra*

¿Cómo pueden los SAF contribuir al mantenimiento y manejo de la biodiversidad en paisajes agrícolas deforestados y fragmentados?

Los SAF proveen hábitat y recursos para especies de plantas y animales, mantienen la conectividad en el paisaje (y de esta manera facilitan el movimiento de animales, semillas y polen), hacen que el paisaje sea menos severo para las especies forestales al reducir la frecuencia e intensidad de incendios, disminuyen los efectos de bordes en los fragmentos forestales remanentes y amortiguan áreas protegidas (Schroth *et al* en imprenta) (Cuadro 2). Los SAF no pueden proveer los mismos nichos ni hábitats que proveen los bosques

originales y no deben ser promovidos como una herramienta de conservación a expensas de la conservación del bosque natural. Los SAF son una herramienta complementaria para la conservación y deben ser incorporados en el manejo de los paisajes para conservar y proteger los fragmentos de bosque remanentes, aumentar la cobertura arbórea en las fincas y amortiguar y conectar las áreas protegidas, por ejemplo, en el Corredor Biológico Centroamericano.

El grado en que los SAF pueden servir a los esfuerzos de conservación depende de su diversidad florística y estructural; su origen y permanencia en el paisaje; su

Cuadro 2. Principios generales de cómo realzar la conservación de la biodiversidad dentro de sistemas agroforestales (SAF) y ejemplos de estudios que ilustran la importancia de cada principio.

Principio	Ejemplos
Maximizar la diversidad florística y estructural de los SAF al incluir especies de plantas de diferentes formas de vida (hierbas, epifitas, lianas, arbustos y árboles) con diferentes arquitecturas	La diversidad y abundancia de especies de aves, plantas, mamíferos e insectos es mayor en los SAF que tienen una alta diversidad florística y estructural (p. ej. sistemas de café rústico) que en los SAF simples o monocultivos agrícolas. Por ejemplo, 184 especies de aves se encontraron en sistemas de café 'rústico' en México (Moguel y Toledo 1999), comparado con solamente 6-12 especies en café sin sombra (Martínez y Peters 1996). En cercas vivas naturalmente regeneradas en Colombia, se encontraron 105 especies de aves de 45 familias. Las cercas vivas más antiguas y estructuralmente más complejas tuvieron más especies de aves y más aves típicas de los bordes de bosque y de vegetación secundaria que las cercas vivas más nuevas y menos complejas (Molano <i>et al</i> en imprenta).
Incluir especies nativas (especialmente aquellas que producen flores, frutos o recursos que son importantes para la vida silvestre)	Los árboles y otras plantas dentro de los SAF proveen hábitats y recursos importantes para muchos mamíferos, insectos y otras especies de animales, particularmente especies arbóreas. En Veracruz, México, 73 especies de aves visitaron cuatro árboles aislados de higos (<i>Ficus yoponensis</i> y <i>F. aurea</i>) en pasturas (Guevara y Laborde 1993). Similarmente, los árboles aislados remanentes en pasturas de Costa Rica fueron visitados por 27 especies de aves frugívoras (Holl <i>et al</i> 2000). En SAF de café, los árboles con largas temporadas de fructificación y floración son particularmente importantes para los colibrís, tángaras y murciélagos frugívoros y nectarívoros (Botero y Barker 2002).
Asegurar la cobertura arbórea durante todo el año Retener epifitas, enredaderas, lianas, malezas y otras plantas dentro de los SAF que puedan proveer nichos para otros organismos	Tener cobertura arbórea durante todo el año es importante para asegurar el hábitat y mantener un microclima estable, tanto para plantas, como para animales (Smithsonian Migratory Bird Center 1999). Los árboles en los SAF pueden retener un gran número de epifitas, lianas y otras plantas. Se encontraron 58 especies de epifitas en sistemas silvopastoriles en México, representando un 37% de la flora epífita de la región (Hietz-Seifert <i>et al</i> 1996). Estas epifitas, a cambio, proveen refugio, sitios de anidamiento y recursos para otros diversos organismos. La presencia de malezas y vegetación arbustiva dentro de los SAF de café favorece la diversidad de aves y mariposas (Botero y Barker 2002).
Mantener una variedad de microhábitats al retener árboles muertos, troncos de árboles caídos, rocas y desechos de hojas dentro de los SAF	Los SAF con una variedad mayor de microhábitats parecen soportar mayor diversidad de animales y plantas que los que carecen de ellos. La cantidad y calidad de desechos de hojas, tanto como la presencia de madera muerta y podrida, puede ser particularmente importante para muchas especies de invertebrados (Botero y Barker 2002; Lavelle <i>et al</i> 2003).
Minimizar el manejo del sistema, especialmente la frecuencia e intensidad del control de malezas, poda y uso de agroquímicos	El uso de pesticidas, herbicidas y fertilizantes puede cambiar drásticamente la composición y abundancia de las especies vegetales y animales locales (encima y debajo de la superficie del suelo). En México, se encontró el doble de especies de insectos en un SAF de café orgánico que en una plantación de café convencional cultivada sin sombra donde se utilizaron agroquímicos (Ibarra-Núñez <i>et al</i> 1995). Las cercas vivas con doseles completos pueden atraer gran número de aves y murciélagos; las cercas que son podadas tienen poco valor de conservación y atraen pocos animales porque tienen poco follaje y pocos sitios para posar o descansar. El control frecuente de malezas en los SAF elimina la regeneración natural de las plantas y reduce la diversidad. En pasturas donde el uso de herbicidas y control manual de malezas es común, se reduce la regeneración de los árboles (Harvey y Haber 1999).

Principio	Ejemplos
Cuando sea posible evitar la entrada dentro de los SAF de animales domésticos (los sistemas silvopastoriles en los cuales los animales son una parte central del sistema son una excepción obvia a esta norma).	Los cerdos, gallinas y ganado generalmente pisotean o dañan el sotobosque o la vegetación en proceso de regeneración, creando un ecosistema menos diverso. La compactación del suelo, que puede ser causada por la ganadería, también puede afectar negativamente comunidades bióticas de suelo, aunque se conoce poco sobre la fauna del suelo en SAF.
Fomentar la regeneración natural dentro de los SAF	La regeneración natural dentro de los SAF es generalmente considerable debido a que las aves, murciélagos y otros animales dispersores de semillas se posan en los árboles y depositan semillas (Slocum y Horvitz 2000). Esta regeneración natural si se deja crecer, puede realzar considerablemente la diversidad de plantas y la productividad de las fincas (Suárez 2001). La capacidad de los SAF para facilitar la regeneración natural fue observada en cortinas rompevientos de 5-6 años de edad en Costa Rica, las cuales contaron con plántulas de 91 especies de árboles en el sotobosque, incluyendo especies de bosques primarios y secundarios (Harvey 2000).
Ubicar los SAF de manera que aumenten la conectividad del paisaje creando corredores y/o puntos discontinuos de paso	Los SAF lineales (p.ej. cortinas rompevientos o cercas vivas) pueden servir como corredores para ciertas especies de animales, especialmente cuando estos SAF son estructural y florísticamente similares a hábitats del bosque y están conectados a parches de bosque (Fritz y Meriam 1993; 1996; Forman y Baudry 1984). Los parches de SAF y árboles individuales dentro de los campos agrícolas frecuentemente sirven como puntos discontinuos de paso para varias especies (especialmente aves), facilitando su movimiento a través de áreas agrícolas extensas y abiertas (Guevara <i>et al</i> 1998; Fischer y Lindenmayer 2002). Al migrar, las aves pueden utilizar los árboles aislados como puntos de parada para pasar la noche y descansar. Esto ha sido documentado para el pájaro campana (<i>Procnias tricarunculata</i>) y el Quetzal (<i>Pharomachrus mocino</i>) en Monteverde, Costa Rica (Harvey <i>et al</i> 2000).
Ubicar los SAF cerca de hábitats naturales que puedan proveer recursos para la vida silvestre y para la propagación de plantas, de manera que los SAF puedan servir como amortiguadores a los fragmentos de bosque remanentes o a las áreas protegidas	Los SAF ubicados cerca de bosques naturales retienen una mayor proporción de la flora y fauna original que aquellos aislados del bosque (Ricketts <i>et al</i> 2001). Por ejemplo, los cafetales ubicados cerca de parches boscosos soportan una mayor diversidad de aves de bosque que los cafetales aislados (Botero y Barker 2002).

localización con respecto al hábitat natural remanente; del grado de conectividad; su manejo y uso (podas, uso de herbicidas o pesticidas, tasa de cosecha de productos maderables y no maderables); la incorporación de ganado doméstico, etc. (Cuadro 2). En general, entre más diverso sea el SAF, menor su intensidad de manejo y más cercano esté al hábitat intacto, mayor será su capacidad para conservar especies nativas de plantas y animales. Algunos SAF, que imitan estrechamente los ecosistemas naturales (p. ej., huertos caseros, agrobosques, SAF rústicos de café y cacao), proveen una variedad de nichos y recursos que apoyan una alta diversidad de plantas y animales (Perfecto *et al* 1996; Rice y Greenberg 2000). Sin embargo, aún los SAF con baja densidad de árboles, baja diversidad de especies, pobre estructuración vertical y horizontal, pueden ayudar a mantener la conectividad biótica (Harvey *et al* en imprenta).

La actitud de la población local hacia la conservación de la biodiversidad y hacia los beneficios (productos, servicios) y pérdidas (p. ej., daño del cultivo por animales; pérdida de animales menores) que ésta causa es de vital

importancia. Por ejemplo, si la caza es intensa, se pone en peligro la viabilidad de las poblaciones de especies cazadas aunque se cuente con un hábitat apropiado.

A pesar de que la literatura sobre la biodiversidad dentro de los SAF ha aumentado, aún no se conoce la viabilidad a largo plazo de las poblaciones de plantas y animales en estos sistemas y lo que sucederá si el paisaje circundante es deforestado aún más. La mayoría de los estudios publicados hasta la fecha han monitoreado o inventariado la biodiversidad dentro de paisajes que todavía retienen alguna cobertura forestal, se han enfocado en pocos grupos (taxa) y se han realizado en escalas espaciales y temporales limitadas. Se necesitan estudios multi-taxa, multi-escala y de largo plazo antes de que se conozca el verdadero valor de los SAF para la conservación.

A pesar de estas limitaciones, ya existe suficiente evidencia de que los SAF ofrecen más esperanza para la conservación de especies de plantas y animales que los monocultivos y ya se utilizan como herramientas de conservación en los paisajes deforestados y fragmentados.

Muchas de estas iniciativas incluyen el pago directo a los agricultores como incentivo para la conservación de la biodiversidad o la certificación de productos amigables con la biodiversidad y con el ambiente (p. ej., cafetales amables a las aves, Smithsonian Migratory Bird Center 1999).

CONCLUSIONES

- Los servicios ambientales que proveen los SAF (conservación del suelo, captura de carbono, calidad de agua y conservación de la biodiversidad) están ganando la atención de investigadores, planificadores y políticos. Sin embargo, debido a que estos beneficios se obtienen a mediano y largo plazo y no son tangibles para los productores y/o los beneficiarios se encuentran más allá de los límites de las fincas, la conservación/adaptación de los SAF puede ser limitada severamente.
- La introducción/promoción de árboles puede aumentar la competencia con cultivos y pasturas y reducir la productividad útil. Se requiere de mecanismos de compensación que estimulen a los productores a incluir árboles dentro de sus campos agrícolas.
- Se necesita más investigación sobre los efectos compensatorios y/o incompatibilidades ("trade-offs") entre los diferentes servicios ambientales que proveen los SAF y sobre los mecanismos de valoración y transferencia financiera requeridos para beneficiar directamente a los productores que proveen estos servicios.
- Se necesita evaluar el efecto de aumentar la población arbórea dentro de los campos agrícolas sobre todos los productos y servicios ambientales y sobre la productividad y rentabilidad de los SAF. También se requiere de estudios sólidos de línea base, de monitoreo y evaluación que demuestren a la sociedad los impactos positivos de los SAF en la sostenibilidad ecológica y financiera a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Anderson, LS; Sinclair, FL. 1993 Ecological interactions in agroforestry systems. *Agroforestry Abstracts* 54: 57-91.
- Andrade C, HJ 1999 Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo Tesis Mag. Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica 70 p
- Ávila H E 2003 Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la zona Sur de Costa Rica. Tesis Mag. Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica 89 p
- Ávila V, G 2000 Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol Tesis Mag. Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica 98 p
- Babbar, L; Zak, DR. 1995. Nitrogen loss from coffee agroecosystems in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *Journal of Environmental Quality* 24 (2): 227-233
- Beer, J. 1988 Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agroforestry Systems* 7:103-114
- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E 1998 Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164
- Bharati, L; Lee, KH; Isenhardt, TM; Schultz, RC 2002 Soil-water infiltration under crops, pasture and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems* 56:249-257
- Bolívar, D; Ibrahim, M; Kass, D; Jiménez, F; Camargo, JC 1999. Productividad y calidad forrajera de *Brachiaria humidicola* en monocultivo y en asocio con *Acacia mangium* en un suelo ácido en el trópico húmedo. *Agroforestería en las Américas* 6 (23):48-50
- Botero, JE; Barker, PS 2002. Coffee and biodiversity: a producer-country perspective. In *Coffee Futures*, CENICAFE, Colombia p. 2-11
- Budowski, G. 1982. Applicability of agroforestry systems. In MacDonald, K (ed.) *Workshop on agroforestry in the African Humid Tropics*. UNU, Tokyo, p. 13-15
- Bustamante J; Ibrahim, M; Beer, J 1998. Evaluación agronómica de ocho gramíneas mejoradas en un sistema silvopastoril con poró (*Erythrina poeppigiana*) en el trópico húmedo de Turrialba. *Agroforestería en las Américas* 5(19): 11-16
- Buresh, RJ; Tian, G 1998. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa. *Agroforestry Systems* 38: 51-76.
- Carter, J 1995 Alley farming: have resource-poor farmers benefited. *ODI-Natural Resource Perspectives* 3 London UK 4 p
- De las Salas, G (ed.) 1979 *Agroforestry systems in Latin America* (Proceedings) CATIE, Turrialba, Costa Rica 220 p
- Charreau C; Vidal, P. 1965. Influence de l'*Acacia albida* Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils *Pennisetum* au Sénégal. *Agronomie Tropicale* 20: 600-626
- Fassbender, HW; Beer, J; Heuvelodop, J; Imbach, A; Enríquez, G; Bonnemann, A 1991 Ten year balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 45:173-183
- Fischer, J; Lindenmayer, DB. 2002 The conservation value of paddock trees for birds in a variegated landscape in southern New South Wales. 2. Paddock trees as stepping stones. *Biodiversity and Conservation* 11: 833-849
- Forman, RT; Baudry, J. 1984. Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology. *Environmental Management* 8(6): 495-510.
- Fritz, R; Merriam, G. 1993 Fencerow habitats for plants moving between farmland and forests. *Biological Conservation* 64: 141-148
- Ganry F; Feller, C; Harmand JM; Guibert, H 2001 Management of soil organic matter in semiarid Africa for annual cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61:105-118.
- Guevara, S; Laborde, J; Sánchez, G 1998. Are isolated remnant trees in pastures a fragmented canopy? *Selbyana* 19(1): 34-43
- Guevara, S; Laborde, J 1993 Monitoring seed dispersal at isolated standing trees in tropical pastures: consequences for local species availability. *Vegetatio* 107/108: 319-338.
- Harmand, JM; Balle, P. 2001. La jachère agroforestière (arborée ou arbustive) en Afrique tropicale. In Floret, C ; Pontanier, R (eds.) *La jachère en Afrique tropicale: Rôles, aménagement, alternatives. De la jachère naturelle à la jachère améliorée*. Le point des connaissances. Libbey Paris, p. 265-292
- Harmand JM; Njiti, CF 1998. Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière. *Agriculture et Développement, Spécial Sols Tropicaux* 18: 21-30.
- Harvey CA 2000 The colonization of agricultural windbreaks by forest trees: effects of windbreak connectivity and remnant trees. *Ecological Applications* 10: 1762-1773.
- Harvey CA; Haber WA 1999 Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. *Agroforestry Systems* 44: 37-68

- Harvey CA; Guindon, CF; Haber, WA; Hamilton DeRosier, D; Murray, KG. 2000 The importance of forest patches, isolated trees and agricultural windbreaks for local and regional biodiversity: the case of Monteverde, Costa Rica. XXI IUFRO World Congress, 7-12 August 2000, Kuala Lumpur, Malaysia, International Union of Forestry Research Organizations, Subplenary sessions, Vol. 1 p. 787-798.
- Harvey, CA; Tucker N; Estrada, A (In press) Live fences, isolated trees and windbreaks: tools for conserving biodiversity in fragmented tropical landscapes? In Schroth G; da Fonseca, GAB; Harvey, CA; Vasconcelos HL; Izac, AM (eds.) Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Island Press.
- Hietz-Seifert, U; Hietz, P; Guevara, S 1996 Epiphyte vegetation and diversity on remnant trees after forest clearance in southern Veracruz, Mexico Biological Conservation 75:103-111
- Holl, KD; Loik, ME; Lin, EHB; Samuels, VA 2000. Tropical montane forest restoration in Costa Rica: overcoming barriers to dispersal and establishment. Restoration Ecology 8:339-349.
- Ibarra-Nuñez, G; Garcia, JA; Moreno, MA. 1995. Diferencias entre un cafetal orgánico y uno convencional en cuanto a diversidad y abundancia de dos grupos de insectos. In Memorias de la primera conferencias internacional IFOAM sobre café orgánico Universidad Autónoma de Chapingo, México p. 115-129.
- Imbach, AC; Fassbender, HW; Borel, R; Beer, J; Bonnemann, A 1989. Modeling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and *Erythrina poeppigiana* in Costa Rica: water balances, nutrient inputs and leaching Agroforestry Systems 8:267-287
- Jackson, J; Ash, A 1998. Tree-grass relationships in open eucalypt woodlands of northern Australian: influence of trees on pasture productivity, forage quality and species distribution Agroforestry Systems 40: 159-176
- Jiménez, F 1986 Balance hídrico de dos sistemas agroforestales: café-poro y café laurel en Turrialba, Costa Rica Tesis Mag Sc UCR-CATIE, Turrialba, Costa Rica 104 p
- Kang BT; Reynolds, L (eds), 1989 Alley farming in the humid and sub humid tropics. Proceedings IDRC, Ottawa, Canada 251 p
- Lavelle, P; Sencapati, B; Barrios, E. 2003. Soil macrofauna In Schroth, G; Sinclair, FL (eds) Trees, crops and soil fertility concepts and research methods. CABI, Wallingford, UK. p 303-323.
- López M, A; Schlönvoigt, A; Ibrahim, M; Kleinn, C; Kanninen, M 1999 Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica Agroforesteria en las Américas 6(23): 51-53.
- Martínez, E; Peters, W 1996. La caficultura biológica: la finca Irlanda como estudio de caso de un diseño agro ecológico In Trujillo, J; de León-González, F; Calderón, R; Torres-Lima, P. (eds.) Ecología aplicada a la agricultura: temas selectos de México: Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F. p 159-183
- Moguel, P; Toledo, VM 1999 Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico Conservation Biology 13(1):11-21.
- Molano JG; Quiceno, MP; Roa, C (in press). El papel de las cercas vivas en un sistema de producción agropecuaria en el piedemonte llanero. In Sánchez, M; Rosales, M (eds.) Agroforesteria para la producción animal en América Latina II. Memorias de la segunda conferencia electrónica de la FAO. Estudio FAO de Producción y Sanidad Animal, Rome.
- Mora CV 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica Tesis Mag Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica 92 p
- Nair, PK (ed). 1989. Agroforestry systems in the tropics. Kluwer, Dordrecht. The Netherlands. 664 p
- Nyberg, G; Hogberg, P. 1995 Effects of young agroforestry trees on soils in on-farm situations in western Kenya Agroforestry Systems 32: 45-52
- Perfecto, I; Rice, RA; Greenberg, R; Van der Voort, ME 1996. Shade coffee: a disappearing refuge for biodiversity BioScience 46(8): 598-608.
- Pomareda C 1999. Perspectivas en los mercados y oportunidades para la inversión en ganadería In Pomareda C; Steinfeld, H (eds.), Intensificación de la ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales. CATIE/FAO/SIDE Costa Rica p 53-74
- Rai, P; Yadav, RS; Solanki KR; Rao, GR; Singh, R 2001 Growth and pruned production of multipurpose tree species in silvo-pastoral systems on degraded lands in semi-arid region of Uttar Pradesh, India Forests, Trees and Livelihoods 11: 347-364.
- Rao, MR; Nair PK; Ong, CK 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems Agroforestry Systems 38: 3-50
- Rhoades, CC; Eckert, GE; Coleman, DC. 1998 Effect of pasture trees on soil nitrogen and organic matter: implications for tropical montane forest restoration Restoration Ecology 6(3): 262-270
- Rice, R; Greenberg, R 2000 Cacao cultivation and the conservation of biological diversity Ambio 29:3.
- Ricketts, TH; Daily GC; Ehrlich PR; Fay JP 2001 Countryside biogeography of moths in a fragmented landscape: biodiversity in native and agricultural habitats. Conservation Biology 15:378-388
- Robinson, PJ; 1985 Trees as fodder crops In Cannell, MGR; Jackson, JE (eds) Attributes of trees as crop plants. Institute of Terrestrial Ecology UK pp 281-300
- Ruiz G. A 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua Tesis Mag Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica 106 p.
- Schroth, G; da Fonseca, GAB; Harvey, CA; Vasconcelos, HL; Izac, AM (in press) Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Island Press, Washington, D.C.
- Schroth, G; Sinclair, FL (eds), 2003. Trees, crops and soil fertility concepts and research methods. CABI, Wallingford, UK. 437 p
- Slocum, MG; Horvitz, CC 2000 Seed arrival under different genera of trees in neotropical pasture Plant Ecology 149: 51-62
- Smithsonian Migratory Bird Center 1999 El cultivo de café con sombra: criterios para cultivar un café "Amistoso con las Aves". <http://web2.si.edu/smbc/coffee/criteria/html>
- Stadtmüller, T 1994. Impacto hidrológico del Manejo Forestal en bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo CATIE, Turrialba, Costa Rica 62 p
- Steppler, HA; Nair, PKR (eds.) 1987 Agroforestry: a decade of development ICRAF, Nairobi, Kenya.
- Suárez, A 2001 Aprovechamiento sostenible de madera de *Cordia alliodora* y *Cedrela odorata* de regeneración natural en cacaotales y bananales indígenas de Talamanca, Costa Rica Tesis Mag Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica 70 p
- Sullivan, GM; Huke, SM; Fox, JM (eds.) 1992. Financial and economic analyses of agroforestry systems. NFTA, Honolulu, Hawaii 312 p.
- Szott, LT; Palm, CA. 1996 Nutrient stocks in managed and natural humid tropical fallows. Plant and Soil 186: 293-309
- Veldkamp E 1994 Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Ph.D. Dissertation Wageningen Agricultural University, The Netherlands 117 p
- Villanueva N, C. 2001. Ganadería y beneficios de los sistemas silvopastoriles en la cuenca alta del Río Virilla, San José, Costa Rica Tesis Mag Sc CATIE, Turrialba, Costa Rica. 107 p.
- Young, A 1989 Agroforestry for soil conservation. C.A.B. International/ICRAF, Wallingford, UK. 276 p.