

Los sistemas agroforestales y su contribución para la mitigación y adaptación al cambio climático

Florencia Montagnini*

Yale University, School of Forestry and Environmental Studies. New Haven, Universidad de Yale, Escuela de Estudios Forestales y Ambientales. New Haven, EUA

RESUMEN

Los sistemas agroforestales (SAF) y los sistemas silvopastoriles (SSP) tienen potencial para la adaptación y mitigación (AyM) del cambio climático (CC), debido al uso como sombra que aminoran el microclima, además de promover la diversificación, y por la acumulación del carbono en biomasa aérea de cultivos, árboles asociados, y partes subterráneas del sistema. Se ha estimado que existen aproximadamente 1000 millones de ha de SAF a nivel global. Los SAF se encuentran ampliamente difundidos en América Latina, con un total de 200-357 millones de ha. La toma de C en SAF con cultivos perennes es mayor que en los SAF con cultivos anuales. Los sistemas de producción ganaderos son fuente de gases de efecto invernadero (GEI) sin embargo existen opciones para disminuir estos impactos, entre ellas el uso de SSP. El potencial para la captura de C por los SAF en su componente aéreo ha sido estimado en 0,29 a 15,21 Mg C/ha/año y para los SSP, se dan cifras de 1,1 a 6,55 Mg C/ha/año, dependiendo de características del sitio, diseño, especies, edad y manejo. Se destaca la importancia de la toma de C en suelos en SAF con valores de 30 a 300 Mg C/ha hasta 1 m de profundidad y de 130 a 173 Mg/ha para los SSP. Tendencias actuales de la agricultura, desarrollo y ambiente promueven sistemas de producción alternativos, tales como los SAF como herramienta efectiva para adaptación y mitigación del cambio climático.

Palabras clave: América Latina, carbono, diversificación, GEI, materia orgánica, microclima

*Autor de correspondencia: Florencia Montagnini

E-mail: florencia.montagnini@yale.edu

Agroforestry systems and their contribution for adaptation and mitigation of climate change

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) and silvopastoral systems (SPS) have potential for adaptation and mitigation (A&M) of climate change (CC), due to the use of shade trees that ameliorate the microenvironment, in addition to promoting diversification, and because of carbon accumulation in aboveground biomass of crops, associated trees, and belowground components of the system. AFS have been estimated to be practiced in approximately 1000 million ha worldwide. AFS are broadly disseminated in Latin America, with a total of about 200-357 million ha. C accumulation rates are larger in AFS with perennial crops than in AFS with annual crops. Cattle production systems are sources of greenhouse gases (GHG); however, there are alternatives to decrease these impacts, among those, the use of SPS. The C capture potential by AFS aboveground components has been estimated in the of 0.29 and 15.21 Mg C/ha/year, and for SPS, values range between 1.1 to 6.55 Mg C/ha/year, depending on site characteristics, design, species, age, and management. The importance of C accumulation in soils is stressed, with values in AFS ranging between 30 to 300 Mg C/ha to 1 m depth, and from 130 to 173 Mg/ha for SPS. Current trends in the agriculture, development and environmental sectors are promoting alternative production systems such as AFS as effective tools for climate change adaptation and mitigation.

Keywords: carbon, diversification, GHG, Latin America, microenvironment, organic matter

INTRODUCCION

Numerosos informes recientes de instituciones académicas, gubernamentales y otros están totalmente de acuerdo en la evidencia sobre el cambio climático global. Han sido presentados escenarios alternativos de aumentos de temperatura para diversas regiones, países, y actividades, con modelos mostrando los efectos sobre eventos, tales como precipitaciones, sequías, cambios en la productividad de cultivos y otros impactos. La información puede variar en cuanto a la magnitud de los impactos, pero lo fundamental es reconocer que los efectos del cambio climático (CC) ya están afectando o afectarán en un futuro muy cercano a todos los organismos vivos que componen los ecosistemas, ya sean éstos naturales o modificados por los seres humanos (IPCC, 2006). Ante esta realidad, los profesionales abocados a las ciencias agrícolas y forestales dirigidas a producir alimentos y materiales para uso humano a nivel mundial, deben tomar decisiones para intentar adaptar o mitigar estos efectos. Esto no es fácil teniendo en cuenta las incertidumbres científicas, las diferentes condiciones ecológicas en las diferentes regiones, y las políticas que puedan influir en las decisiones que se tomen con respecto a las estrategias de adaptación y mitigación (AyM).

Los impactos del cambio climático sobre la agricultura han sido documentados ampliamente. La capacidad de adaptación global de los cultivos se espera disminuya en 2050 según modelos de aumento de temperatura con el CC. Para cultivos de importancia para las economías de los países de América Latina como en el caso del café en Brasil, México, Nicaragua, existen mapas donde se observa el cambio en las regiones aptas para cultivo a medida que cambian las condiciones del clima de cada región (Pinto *et al.*, 2002; Jarvis *et al.*, 2010).

Ante esta situación es necesario desarrollar estrategias de AyM que al mismo tiempo mantengan o incrementen la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y forestales. En este sentido se abren numerosas oportunidades con los sistemas agroforestales (SAF), la combinación de cultivos y/o animales con especies arbóreas o arbustivas en el mismo terreno en diseños espaciales o temporales (Montagnini *et al.*, 1992). Los SAF se encuentran ampliamente difundidos en América Latina, con un total de 200-357 millones de ha, incluyendo 14-26 millones de ha en América Central, y 88-315 en América del Sur, siendo los más prominentes los sistemas silvopastoriles comerciales y los de cultivos perennes bajo sombra (incluyendo especies como el café (*Coffea* spp.) y el cacao (*Theobroma cacao* L.) (Somarriba *et al.*, 2012).

Con referencia a la adaptación, una de las estrategias favorecidas por los SAF es el cambio a otros cultivos, lo cual es generalmente más factible en agricultores que practican SAF, ya que estos sistemas involucran combinaciones de especies de cultivos y/o animales, generando agroecosistemas de mayor diversidad, lo cual redundará en mayor flexibilidad ante los cambios. Otra estrategia es el cambio en la ubicación de cultivos a otras zonas más adecuadas. Por ejemplo, siendo que la temperatura promedio disminuye aproximadamente 1°C por cada ~ 400 m a medida que se asciende en altitud, según la adaptabilidad de los cultivos y otros factores, es factible que la agricultura “se suba por las laderas” (Jarvis *et al.*, 2010). Asimismo, estudios en SAF han demostrado que bajo los árboles del dosel, de una altura promedio de 20 m, hay una disminución de ~ 2 °C de temperatura en comparación con un sitio sin árboles, por lo cual se sugiere que sería posible enfrentar aproximadamente 50 años de cambio climático con el uso de árboles de sombra en SAF (Jarvis *et al.*, 2010).

Asimismo, la disminución de la temperatura del aire bajo el dosel arbóreo es una de las ventajas principales de los sistemas silvopastoriles (SSP), un tipo de SAF donde se combinan elementos leñosos (árboles o arbustos) con pasturas y animales. Los SSP generan un microclima que puede mitigar los efectos desfavorables de los fenómenos climáticos como ENSO (El Niño), con una disminución de 2 a 3°C en temperatura anual promedio, con un 10 a 20% mayor promedio anual de humedad relativa, y menor evapotranspiración anual (Murgueitio e Ibrahim 2009; Murgueitio *et al.*, 2011).

El presente artículo es una revisión del potencial de los SAF para la adaptación y mitigación (AyM) del cambio climático (CC), con énfasis en América Latina. Se presenta evidencia documentada de casos de adaptación al CC en

SAF con cultivos perennes tales como el café, en los SSP, y los factores que influyen sobre uso de SAF para AyM. Seguidamente se muestran resultados de investigaciones sobre el papel de los SAF en aspectos relacionados con la mitigación del CC, toma de C en diferentes tipos de SAF (SAF con cultivos anuales, SAF con cultivos perennes, y sistemas silvopastoriles (SSP)). Se destaca además la importancia de la toma de C en suelos y las técnicas adecuadas para lograr buenas estimaciones. Finalmente se discute cómo pueden los SAF ser una herramienta efectiva para AyM del cambio climático.

Beneficios de los sistemas agroforestales para hacer frente a los cambios climáticos

Análisis a nivel de finca han demostrado que grandes reducciones en los impactos adversos del cambio climático son posibles cuando las estrategias de adaptación se aplican plenamente (Mendelsohn y Dinar, 1999). Las estrategias de adaptación al CC pueden incluir:

- Cambio de cultivos hacia otros mejor adaptados
- Selección de cultivos (genotipos adaptados / variedades de mayor rendimiento)
- Ajuste de las temporadas de cosecha
- Uso de sistemas de control de plagas y enfermedades cuya incidencia o gravedad es influida por el CC
- El movimiento de cultivos a elevaciones más altas
- Cambios en el uso de la tierra hacia otras actividades productivas
- Mejora en los sistemas de agua de riego
- Establecimiento de sistemas de drenaje/almacenamiento de agua
- Seguros para los agricultores como salvaguarda
- Políticas para el desarrollo del mercado de especies de cultivos nuevos y existentes
- Implementación y manejo de los SAF adecuado al CC.

En general la diversificación económica ha sido una estrategia para manejar el riesgo (tanto el riesgo climático como el de los mercados). Aunque no sea una adaptación directa al CC, la diversificación disminuye la dependencia de los agricultores al ingreso de la agricultura y les permite mayor flexibilidad en el manejo de los cambios ambientales (Afanador Ardila, 2008). Los SAF tal como se mencionó anteriormente tienden precisamente a lograr mayor diversificación tanto a nivel de sistema de producción, de finca, y del paisaje.

A nivel del cultivo, el diseño adecuado de SAF puede a su vez contribuir

a la adaptación al CC. Estos aspectos son especialmente relevante para los cultivos de mayor importancia en América Latina, tales como el café (Somarriba *et al.*, 2012). Estudios de campo en SAF de café para hacer frente a los cambios climáticos realizados en Chiapas y en Veracruz, México, destacan que los eventos climáticos extremos: sequías, inundaciones, heladas y olas de calor afectan a la producción de café (Afanador Ardila, 2008; Pinto *et al.*, 2002). Las sequías/olas de calor en verano disminuyen la calidad de la producción y la producción total. El CC aumenta la frecuencia y severidad de estos eventos. En los SAF de café con sombra, las fluctuaciones de temperatura, humedad y radiación solar disminuyen considerablemente a medida que aumenta la densidad de la sombra, lo que permite acercarse a las condiciones ideales de crecimiento. La reducción de la variabilidad del microclima en los sistemas de café con sombra sugiere que los árboles de sombra pueden proteger a las plantas de café de la variabilidad del microclima. La temperatura óptima media anual de café arábigo es de 18-21°C. La reducción de las fluctuaciones en la temperatura ayudará a que el café permanezca a la temperatura óptima. La reducción de la humedad durante el día también es de utilidad ya que permite menor pérdida de agua por evapotranspiración del sistema (Afanador Ardila, 2008).

Otros efectos de los árboles de sombra en las variables del microclima incluyen protección contra insolación solar excesiva, contra vientos fuertes durante tormentas, y contra impactos negativos que puedan tener las lluvias torrenciales. En el caso de la yerba mate, *Ilex paraguariensis*, ampliamente cultivada en NE de Argentina, S de Brasil y Paraguay tanto en plantaciones abiertas como en SAF, los árboles acompañantes cumplen esta función protectora además de mejorar las condiciones de fertilidad del suelo según las especies (Montagnini y Piotto, 2011) (Figura 1).

Otros efectos favorables de los SAF incluyen la obtención de productos de mejor calidad en café de SAF con sombra que en café sin sombra, en estudios realizados en Costa Rica (Muschler, 2001). Asimismo, trabajos realizados en Chiapas, México demuestran aumentos en el rendimiento a medida que aumenta la densidad de sombra en un rango de 23 a 38% sombra; el rendimiento se mantiene entre 38-48% de sombra, mientras que disminuye con un 50% o más de sombra (Soto-Pinto *et al.*, 2000).

En resumen, los beneficios de los SAF que directa o indirectamente contribuyen para hacer frente a los cambios climáticos pueden incluir muchas de las ventajas por las que generalmente se fomentan los SAF (Montagnini *et al.*, 1992; Montagnini y Nair, 2004; Nair *et al.*, 2009):

- Cambios en las condiciones microclimáticas (tal como se mencionó para el caso del café y de la yerba mate)
- Eficiencia del uso del agua de lluvia
- Protección contra las precipitaciones fuertes

- Conservación del suelo y agua
- Fertilidad del suelo (reciclaje de nutrientes)
- Absorción de agua / infiltración (reducción de la erosión)
- Aumentos de la producción y sostenibilidad a largo plazo
- Reducción de la incidencia de algunas plagas y malezas
- Diversificación de los sistemas agrícolas y de los ingresos



Figura 1. Sistema agroforestal combinando arbustos de yerba mate (*Ilex paraguariensis*) con árboles maderables como el timbó y cultivos alimentarios en Misiones, NE Argentina. La yerba mate se encuentra mejor protegida en SAF del exceso de insolación, y de los impactos de vientos y lluvias fuertes que en monocultivo (Montagnini y Piotto, 2011). El Timbó (*Enterolobium contortisiliquum*), un árbol nativo del bosque Atlántico de Misiones, fija nitrógeno atmosférico y favorece el crecimiento de yerba mate y otros cultivos. El suelo permanece cubierto evitando así la erosión y degradación, y el agricultor obtiene varios productos diferentes de su terreno lo cual diversifica el ingreso y disminuye los riesgos. Foto: F. Montagnini.

- Contribución a la seguridad alimentaria
- Contribución a la conservación de la biodiversidad y otros servicios ambientales

Por otro lado, como en todas las alternativas de usos de la tierra deben considerarse posibles desventajas del uso de SAF, las cuales pueden consistir en competencia por el agua y los nutrientes entre los diferentes componentes del sistema (especialmente durante las sequías, y en suelos pobres); mayor incidencia de ciertas plagas, ejemplo enfermedades fungosas en café, cacao; necesidad de mano de obra (para la poda y otras tareas); adoptabilidad (influida por los factores ya mencionados, además de las tradiciones de los agricultores, su aversión al riesgo y otros factores).

Para lograr un balance adecuado entre estas ventajas y desventajas es posible realizar un análisis de la eficiencia económica de los SAF como estrategia de adaptabilidad al CC, examinando los beneficios netos de los SAF, para ver si los agricultores están o no en mejor situación con SAF. Los detalles de la implementación y manejo de los SAF dependerán de las condiciones locales que varían para cada agricultor. Deben compararse los beneficios netos de los SAF a lo largo de gradientes regionales de temperaturas y humedad, para poder determinar en qué punto los beneficios netos de los agricultores se aprovechan al máximo, y lograr un punto de vista acertado sobre las regiones donde los SAF son una opción eficiente para la adaptación al CC (Afanador Ardila, 2008).

Los SAF y la mitigación del cambio climático

A nivel global, se ha estimado que existen aproximadamente 1000 millones de ha de SAF, lo cual afirma el ímpetu que ha tomado la diseminación e implementación de estos sistemas. Sumado a esta actual superficie, se puede agregar el potencial de vastas áreas que actualmente sostienen sistemas de uso de la tierra no sostenible o poco productivos que podrían ser convertidas en SAF en un futuro cercano (Nair *et al.*, 2009; Nair *et al.*, 2010). Los SAF pueden tener un papel importante en la mitigación del CC al disminuir la presión sobre los bosques naturales, los cuales son el mayor reservorio de C, además de contribuir a la toma de C en el componente arbóreo, cultivos, y suelos (Montagnini y Nair, 2004). De esta manera los SAF pueden ser un instrumento importante para los programas que financian sistemas de uso de la tierra que eviten la deforestación, tales como REDD+, con la ventaja que además tienen funciones en AyM del CC, y sus beneficios económicos, sociales y ambientales.

Captura de C en SAF

Existe mucha variabilidad en el potencial para la toma de C entre las diferentes especies utilizadas en SAF, sea árboles, arbustos, o cultivos, unido a la variabilidad esperada entre regiones, sumado a las diferentes prácticas de manejo que también pueden afectar estas tasas. Variaciones en las condiciones ambientales (clima, suelos) pueden afectar la toma de C dentro de una región determinada.

Los supuestos utilizados en los cálculos pueden originar errores en las estimaciones de biomasa y C (densidad de madera, contenido de C en tejidos, ecuaciones alométricas y modelos). Es necesario tomar en consideración esta variabilidad al realizar estimaciones y extrapolaciones (Nair, 2011).

Como consecuencia de lo anterior, las estimaciones del potencial para la captura de C por los SAF son altamente variables, con tasas que van de 0,29 a 15,21 Mg C/ha/año para la parte aérea del sistema (Nair *et al.*, 2009, 2010). Estos valores son el resultado del potencial productivo del sistema, el cual depende de características del sitio así como del tipo de SAF, las especies involucradas, edad, y manejo (Montagnini y Nair, 2004; Verchot *et al.*, 2007; Nair *et al.*, 2009, 2010). Para el caso particular de los SSP, informes recientes brindan cifras para la vegetación (incluye en este caso tanto las partes aéreas como las subterráneas) de 1,1 a 6,55 Mg C/ha/año dependiendo nuevamente de la localización geográfica así como del tipo de SSP, su edad, diseño y manejo (Nair *et al.*, 2009).

Captura de C por especies arbóreas nativas en Costa Rica

En nuestras investigaciones sobre el crecimiento y adaptabilidad de especies nativas para su uso forestal y agroforestal realizadas en terrenos de la Estación Biológica La Selva en zona lluviosa del Caribe de Costa Rica, encontramos la mayor capacidad para la toma de C en rodales puros y mixtos de *Vochysia guatemalensis* (chancho, mayo, Vochysiaceae). En nuestros ensayos, a los 16 años de edad esta especie alcanzó 27,4 cm de DAP (diámetro a la altura del pecho) en plantación pura, y 37,9 cm parcelas mixtas combinadas con otras 2 o 3 especies arbóreas. Esta especie además de su buen crecimiento, protege los suelos contra la erosión, y tiene la ventaja de estar adaptada a suelos muy pobres, ácidos, de alto tenor de aluminio, y de mal drenaje, produciendo madera de buena calidad en turnos relativamente cortos. En el mismo terreno, otras especies arbóreas nativas: *Hyeronima alchorneoides* (pilón, zapatero, Euforbiaceae); *Terminalia amazonia* (roble coral, amarillón, Combretaceae), y *Vochysia ferruginea* (botarrama, Vochysiaceae) también dieron buenos resultados en cuanto a acumulación de biomasa y adaptabilidad (Piotto *et al.*, 2010; Montagnini, 2011; Montagnini y Piotto, 2011) (Figura 2). Estos son factores importantes para la selección de especies para usos forestales y agroforestales.

Nuestro proyecto además ha desarrollado ecuaciones alométricas que permiten calcular la biomasa y C en base al diámetro a la altura del pecho de manera no destructiva (Montero y Montagnini, 2005). Otras investigaciones en CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) y otras instituciones han desarrollado modelos de simulación para estimar la toma de carbono a largo plazo. Otras herramientas para la estimación de la captura de C en bosques, plantaciones forestales y SAF incluyen el modelo CO2FIX v3 (CATIE) (www.efi.gi/projects/casfor) el cual puede usarse para calcular el C en todos los compartimentos del sistema (suelos, raíces, vegetación), la metodología de la Rainforest Alliance para SAF de café (Rainforest Alliance, 2009), y

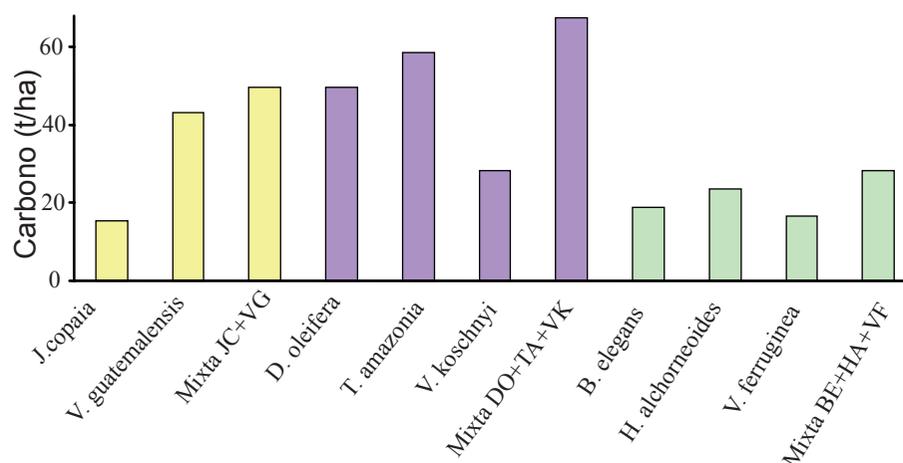


Figura 2. Captura de carbono en biomasa aérea total por especies arbóreas nativas en plantaciones puras y en mixtas a 16 años de edad en La Selva, Costa Rica (basado en Piotto *et al.*, 2010; Montagnini y Finney, 2011; Montagnini y Piotto, 2011).

otros. Este tipo de herramientas ha sido útil para la estimación de la toma de C en diferentes tipos de SAF. A continuación se presentan datos de toma de C en SAF con cultivos anuales, SAF con cultivos perennes, y SAF con animales, o sea sistemas silvopastoriles (SSP).

Toma de C en SAF con cultivos anuales y perennes

Existen estudios de toma de C realizados en SAF de “cultivos en callejones”, donde cultivos anuales se siembran entre hileras de árboles cuya poda produce biomasa para fertilizar el suelo en los callejones que se encuentran entre las hileras. De datos de un estudio de dos SAF de cultivos en callejones realizados en CATIE en Turrialba, Costa Rica, Koskela *et al.* (2000) estimaron la acumulación anual de las partes ‘lábil’ del sistema (C almacenado en follaje y ramas de los árboles, y el C en los cultivos anuales de maíz y frijol), y los compararon con la acumulación o almacenamiento ‘permanente’ en los troncos de los árboles de *Erythrina poeppigiana*. En este SAF con cultivos anuales, el almacenamiento de C por las partes perennes del sistema fue mayor que en las lábil, pero aún así fue bastante inferior al C acumulado en otros tipos de SAF con cultivos perennes.

En general el estudio concluye que los cultivos en callejones presentan un bajo potencial para el almacenamiento de C. Como los árboles son podados para depositar su material en los callejones, el C solamente es almacenado en los troncos que quedan luego de la poda. La frecuencia de poda, que puede ser cada dos meses durante el periodo de crecimiento, afecta mucho la capacidad de almacenamiento de C.

Por otro lado existen numerosos trabajos de estimaciones de C en SAF

de combinaciones de árboles con cultivos perennes tales como cacao y café. Por ejemplo, usando resultados de estudios de C almacenado en SAF de cacao con árboles de sombra en Turrialba, Costa Rica, Koskela *et al.* (2000), analizando datos de Beer *et al.* (1990), mostraron que el C almacenado en biomasa vegetal perenne fue similar para los dos sistemas estudiados: 4,28 Mg C/ha/año para el sistema cacao-*Cordia alliodora*, y 3,08 Mg C/ha/año en el sistema cacao-*Erythrina poeppigiana*. A pesar de estos valores relativamente elevados, éstos eran solamente un 50% de los valores del bosque natural. Otros estudios de biomasa y toma de C en otras partes del mundo y con otras especies también muestran que los SAF con cultivos perennes acumulan cantidades de C considerablemente mayores que los monocultivos de especies anuales. Sin embargo estas tasas de toma de C son inferiores a los valores de los bosques naturales de cada región (Montagnini y Nair, 2004). En conclusión, puede decirse que los SAF con cultivos perennes pueden ser importantes en el almacenamiento de C, mientras que los SAF con cultivos anuales y manejo intensivo son más parecidos a la agricultura convencional.

La ganadería y el cambio climático: alternativas

Los sistemas de producción ganadera proveen aproximadamente el 30% del consumo de proteína que realizan los seres humanos, utilizan cerca del 30% de la superficie de la tierra mundialmente, y contribuyen al bienestar de 1,3 billones de personas, especialmente en zonas rurales pobres (Steinfeld *et al.*, 2006). Por otro lado los sistemas de producción ganadera también tienen fuertes impactos ambientales, ya que a nivel mundial el sector contribuye con 18-20% de emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI).

En América Latina el sector ganadero produce 58 a 70% de las emisiones de GEI totales de la agricultura (World Bank, 2010). Cerca del 40% de emisiones de GEI del ganado (metano, CH₄ y óxido nitroso, N₂O) provienen de la fermentación entérica (Steinfeld *et al.*, 2006). Es importante notar que ambos GEI tienen mayor efecto en calentar la atmósfera que el dióxido de carbono: el CH₄ con 23 veces mayor potencial y el N₂O con 296 veces el potencial del CO₂ (Steinfeld *et al.*, 2006). En consecuencia debemos considerar los compromisos existentes entre los objetivos del uso de recursos para producir alimentos, las emisiones de GEI por parte de los sistemas de producción, y las formas de vida de las poblaciones humanas que es preciso mantener y mejorar (Steinfeld *et al.*, 2006; Murgueitio e Ibrahim, 2009).

Ante esta situación se presentan diversas alternativas:

1. Adaptación de estrategias de alimentación del ganado para reducir emisiones de GEI: por ejemplo, si se alimenta el ganado con forraje de leguminosas que contienen taninos condensados (*Lotus* spp., *Luecaena*, otras especies) se puede disminuir la emisión de metano en 12 –15% y aún obtenerse mejoras en la productividad del ganado (Waghorn, 2008; Barahona *et al.*, 2003) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Emisión de metano por diferentes sistemas de pasturas (g de metano/kg materia seca de forraje consumido por el ganado).

Tipo de pastura	CH ₄ /kg forraje
Nativa o naturalizada- <i>Hyparrhenia rufa</i>	30-35
Pastura mejorada- <i>Brachiaria brizantha</i>	26-28
Sistema Silvopastoril (SSP) con <i>Leucaena</i>	16-18

Fuente: Ibrahim y Guerra, 2010.

2. Planificación de sistemas de producción ganadera para que tomen carbono: los “Sistemas de C neutral” pueden neutralizar un nivel dado de emisiones, dependiendo de su capacidad de reducir emisiones, eliminar emisiones, o usar créditos de C que demuestren integridad ambiental en mercados nacionales o internacionales (Murgueitio e Ibrahim, 2009; Ibrahim y Guerra, 2010).

Las emisiones de CH₄ pueden ser 15-18% mayores en la estación seca debido al menor valor nutritivo del forraje. El IPCC define tres rangos de digestibilidad del forraje: 45-55% es baja, 55-75% es mediana, 75-85% es alta calidad nutritiva (generalmente en los suplementos alimentarios) (Ibrahim y Guerra, 2010).

Toma de C en sistemas silvopastoriles

La toma de C en pasturas puede aumentar sustancialmente con el pastoreo controlado, el establecimiento de especies de pasturas adecuadas, y el uso SSP (Lal, 2005; Ibrahim *et al.*, 2007; Murgueitio e Ibrahim, 2009; Murgueitio *et al.*, 2009). En investigaciones recientes sobre el balance del C en SSP realizadas en Costa Rica, Colombia, y Nicaragua se examinó el almacenamiento del C aéreo y en partes subterráneas incluyendo suelos, en diversos usos de la tierra incluyendo pasturas degradadas, pasturas mejoradas, bosques secundarios y plantaciones forestales (Ibrahim *et al.*, 2007). Los estudios se realizaron en fincas ganaderas en los departamentos del Quindío y Valle del Cauca en Colombia, en el condado de Esparza en Costa Rica y en la municipalidad de Matiguás, Nicaragua. Estas áreas son parte del proyecto “Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas (GEF Silvopastoril)”, conducido por CATIE en Costa Rica, CIPAV en Colombia y Nitlapán en Nicaragua, financiado por GEF, FAO y el Banco Mundial (Murgueitio e Ibrahim, 2009; Ibrahim *et al.*, 2011; Murgueitio *et al.*, 2011).

En este proyecto, en estudios sobre la toma de carbono en bosques naturales, pasturas degradadas y SSP, se examinaron las reservas de carbono del suelo y de la biomasa aérea de las plantas. Los suelos fueron muestreados a una profundidad de 1 m en pasturas degradadas y en otros seis usos de la tierra comunes en las regiones ganaderas de Costa Rica, Nicaragua y Colombia. En Costa Rica, las

pasturas degradadas tuvieron el menor nivel de C orgánico del suelo (COS) (22 Mg C/ha). Los otros usos del suelo no mostraron diferencias estadísticamente significativas, con 96 MG/ha en las plantaciones de árboles y 140 MG/ha en pasturas mejoradas sin árboles. Las plantaciones de teca y bosque secundario tuvieron la mayor cantidad de C en biomasa aérea (alrededor de 90 Mg/ha). Los resultados en general muestran que las pasturas degradadas tenían las menores reservas de C. Los autores concluyen que la toma de C puede aumentar mediante el uso de pastos mejorados, y con la adición de árboles en el paisaje, en SSP, plantaciones forestales y bosques ribereños (Ibrahim *et al.*, 2007; Ibrain y Guerra, 2012).

Los investigadores del CATIE están actualmente evaluando el balance de GEI en fincas ganaderas en diversas regiones de Costa Rica con el objetivo de desarrollar SSP que sean carbono-neutrales (Ibrahim *et al.*, 2010). Para ello, el C en biomasa y suelos es comparado entre usos de la tierra incluyendo pasturas degradadas, pasturas mejoradas con alta y baja densidad de árboles, bancos forrajeros, plantaciones forestales y bosques secundarios. En la región del Pacífico seco de Costa Rica estos autores han demostrado que fincas ganaderas podrían mitigar entre 2,2 y 10,6 t de CO₂e¹ por ha por medio de la incorporación de SSP con potencial para la toma de C en biomasa aérea y suelos. El uso de buenas prácticas de manejo de los SSP y a nivel de fincas, incluyendo uso de vermicompost, biogás, ensilaje y protección de bosques también contribuyen a la absorción de CO₂ (GAMMA, 2010).

Uso de árboles nativos en SSP

Existen numerosos antecedentes del uso de especies de árboles nativos en SSP con buenos resultados en referencia a la mejora del microambiente, la diversidad de productos, a la productividad y confort de los animales (Figura 3). Asimismo, han sido documentados recientemente resultados con respecto a la toma de C en biomasa aérea y subterránea, así como en suelos de SSP con especies nativas.

El CIPAV (Centro Internacional para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria) en su trabajo mencionado antes tanto en Colombia, como en otros países, incluyendo el uso de especies de árboles nativos como parte de los SSP intensivos (SSPi) (Murgueitio y Solorio, 2008; Murgueitio *et al.*, 2011) Los SSPi son un tipo que combina arbustos forrajeros establecidos a densidades altas (entre 10 y más de 60 mil por ha) para ramoneo intercalados con pasturas mejoradas de alta productividad (cespitosas y estoloníferas) y árboles maderables. Los arbustos forrajeros pueden ser de especies exóticas tales como la *Leucaena*, o el botón de oro, *Tithonia diversifolia*, pero muchos de los árboles maderables de los SSPi son de especies nativas. Los árboles nativos también son integrados como parte del paisaje ganadero en forma de corredores donde cumplen funciones favorables para la fauna (Murgueitio *et al.*, 2011).

En un estudio de C de SSP en las tierras bajas de Cañas, zona del Pacífico seco de Costa Rica, pasturas con especies de pastos de rápido crecimiento



Figura 3. Sistema SSP de árboles de Yopo (*Anadenanthera peregrina*) + Pasto amargo (*Brachiaria decumbens*), con ganado de doble propósito (leche-carne) en el municipio de Restrepo (Meta, Colombia), condiciones de bosque húmedo tropical a 360 msnm. El Yopo es un árbol nativo de los Llanos Orientales de Colombia. Su madera es utilizada para la elaboración de la “mamona” o “ternera a la llanera” (plato típico de carne de ternera asada a fuego muy lento). Su madera se quema lentamente, produce mucho calor y genera poco humo. Es un árbol leguminoso de folíolos pequeños lo cual produce una sombra dispersa que permite buen proceso fotosintético del estrato herbáceo. Tiene el inconveniente de que es muy palatable cuando es pequeño, por lo cual es necesario utilizar estrategias para evitar daños por parte de los bovinos. Los ovinos no lo consumen (Vladimir Sánchez Moreno, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta, Colombia, <http://www.sistemaagroecologicos.com>)

Foto: Vladimir Sánchez Moreno.

(*Brachiaria brizantha*) fueron comparadas con los pastos tradicionales usados en la región, dominados por *Hyparrhenia rufa*. Tres especies de árboles nativos fijadores de nitrógeno (*Pithecellobium saman*, *Diphysa robinoides* y *Dalbergia retusa*) fueron plantados con una distancia de 2x2 m dentro de las líneas, con callejones de 8 m de ancho entre las hileras de árboles. Las parcelas fueron pastoreadas por 4 o 5 días con intervalos de 1 a 2 meses de descanso. El C total del sistema (parte aérea y subterránea de la fitomasa) fue de 12,5 Mg C/ha en SSP y 3,5 Mg C/ha en los controles de pastos sin árboles. *B. brizantha* parece estimular la producción de las raíces del árbol, lo cual fue altamente correlacionado con el C orgánico total del suelo (COTS) en los primeros 60 cm de profundidad, lo que resulta en incrementos anuales en COTS de hasta 9,9 Mg/ha/año (Andrade *et al.*, 2008).

En Venezuela existen numerosas experiencias con árboles nativos utilizados de manera exitosa en SSP, con beneficios de los árboles sobre la productividad de los pastos asociados (Solórzano *et al.*, 1998). Asimismo cabe mencionar experiencias actuales que lleva a cabo la compañía Nestlé fomentando SSP con productores en el sur del estado Táchira y en alto Apure, como parte del Plan de Fomento Lechero de Nestlé (Eduardo Escalante, comunicación personal, Febrero 2012; Julián Páez, Noviembre 2011). Al difundirse estos sistemas en el país sería importante estimar el balance del C para tender a éstos a ser C neutral tal como lo mencionado anteriormente para Costa Rica.

En resumen, los SSP basados en animales rumiantes son fuentes de GEI, y cuando se practican de forma no sostenible, la compactación y erosión pueden provocar pérdidas adicionales de C y N de los suelos. Sin embargo, los sistemas de ganadería son parte de las culturas humanas y son un importante componente en economías de subsistencia en zonas rurales. En consecuencia a pesar de ser temas controversiales en relación a sus impactos ambientales, muchos sistemas de pastoreo continúan siendo parte importante de los paisajes rurales. En este contexto, es urgente diseñar y manejar SSP que puedan compensar emisiones del sistema mismo y aún de afuera del sistema, con estrategias similares a las descritas anteriormente, adaptadas a las condiciones particulares de cada región.

Toma de C en suelos en SAF

A nivel mundial, los suelos, dependiendo del ecosistema y clima de la región de que se trate, contienen tanto o más C que la vegetación que crece sobre ellos, de manera que la materia orgánica del suelo (MOS) juega un papel crucial en el ciclo global del C (Lal, 2005; Steinfeld *et al.*, 2006). Las técnicas agrícolas que aumentan la toma y conservación de MOS pueden tener un fuerte impacto sobre el ciclo global del C: entre ellas se incluyen los cultivos mixtos, el uso de residuos como mulch y otras técnicas que son utilizadas en “agricultura alternativa”, en sistemas orgánicos, y en SAF (Montagnini y Nair, 2004; Nair, 2011). Los SAF pueden tener también otros efectos positivos sobre el aumento del C del suelo, de manera indirecta, como cuando contribuyen a reducir la erosión.

La acumulación de C en suelos ocurre cuando se utilizan prácticas de manejo del suelo comunes en diversos tipos de SAF, las cuales están dirigidas a lograr lo siguiente:

- Disminuir la temperatura del suelo, tal como el uso de mantillo (mulch) o la sombra,
- Aumentar la fertilidad (ej., con especies fijadoras de N),
- Lograr una mejor aireación (menores perturbaciones, menor labranza).

La dinámica del C orgánico del suelo (COS) luego de la conversión de bosque tropical a agricultura y otros usos de la tierra, sirve para entender el potencial para recuperar COS por medio de uso de prácticas adecuadas. La

pérdida de COS debido a la conversión de un tipo de uso de la tierra a otro es equivalente a la capacidad del suelo para acumular C, tanto en el tamaño del reservorio de COS, como en su tasa de aumento. La tasa de aumento depende del punto de referencia, con mayores tasas de aumento en suelos muy degradados (Lal, 2004; 2005).

En general los SAF, incluyendo los SSP, tienen mayor potencial para la captura de COS que las pasturas convencionales (Lal, 2004; Montagnini y Nair, 2004; Nair *et al.*, 2010). Los SAF tienen tasas de aumento de COS intermedias entre las de plantaciones arbóreas convencionales y las de agricultura con labranza mínima (Lal, 2005; Nair *et al.*, 2009).

Estimaciones del COS almacenado por los SAF dan valores de 30 a 300 Mg C/ha en estudios realizados hasta 1 m de profundidad en el suelo (Nair *et al.*, 2010). Para los SSP se dan valores de 6,9 a 24,2 Mg/ha en regiones templadas y de hasta 130 a 173 Mg/ha en regiones tropicales; sin embargo, estas cifras deben ser interpretadas teniendo en cuenta la profundidad de muestreo del suelo y los métodos utilizados para el análisis del COS (Nair *et al.*, 2009; 2010; Gama Rodrigues *et al.*, 2010; Nair, 2011).

En nuestras investigaciones sobre el crecimiento y adaptabilidad de especies nativas en la Estación Biológica La Selva en Costa Rica, mencionadas anteriormente, se muestrearon los suelos para comprobar si los árboles nativos contribuían a su restauración y a la toma de COS. Fueron comprobados efectos tempranos: a los 3 años de edad, en los primeros 15 cm el COS había aumentado bajo los árboles, con valores de 2,25-3,3% según las especies, mientras que en las pasturas degradadas el COS fue de 2,4%, y en un bosque secundario de 20 años de edad adyacente fue similar a lo encontrado bajo los árboles, 3.7%. Los mayores valores de COS se encontraron bajo la copa de *Vochysia ferruginea*, que fue la especie que produjo la mayor cantidad de hojarasca. En estos sistemas, el ganado se alimenta de pastos que crecen de manera natural. Dado el potencial de estos SSP para acumular C tanto en partes aéreas como subterráneas, deberían fomentarse, diseñando SSP que incluyan otros forrajes más productivos y que estén bien adaptados a su combinación con estas especies de árboles nativos (Montagnini, 2008, 2011).

Fracciones de COS estable y lábil

El C estable del suelo representa un reservorio a largo plazo (un “sink”), mientras que el C lábil es el que tiene posibilidad de que sea liberado en un plazo corto a mediano, lo cual significa que no es un reservorio a largo plazo. Es importante tener en cuenta los mecanismos que controlan la estabilización y la liberación del COS si se espera que el C almacenado se conserve a largo plazo. Estos mecanismos pueden incluir 1- Protección física del COS por oclusión dentro de agregados del suelo; 2- Protección química por interacción con superficies minerales o con otras moléculas orgánicas; 3- Preservación de compuestos orgánicos recalcitrantes debido a su composición elemental y conformación

molecular. La protección física o por formación de complejos órgano-minerales es más importante que la resistencia de la MOS debido a su composición química (Gama Rodrigues *et al.*, 2010; Nair *et al.*, 2010; Nair, 2011).

Muchas prácticas de manejo de suelos en SAF pueden dar como resultado mejoras en la estructura del suelo, con una redistribución de clases de tamaño de los agregados, llevando a un aumento de la cantidad de macro-agregados grandes. El aumento del tamaño de los agregados a su vez disminuye el riesgo de erosión, contribuyendo así a una mayor estabilidad del COS acumulado y a una mayor sostenibilidad del sistema (Mutuo *et al.*, 2005).

De manera que para entender mejor el proceso de almacenamiento del COS, se han realizado estudios enfocados en el COS en los diferentes agregados del suelo (Nair *et al.*, 2009; 2010; Nair, 2011). Las metodologías incluyen la separación del suelo en clases de agregados de diferentes tamaño, en determinaciones de laboratorio adecuadas al tipo de suelos que se está estudiando (Gama Rodrigues *et al.*, 2010; Mutuo *et al.*, 2005). Por ejemplo, en un estudio sobre fracciones lábiles y estables de COS en SAF en Kenia, en barbechos mejorados que fueron plantados con *Crotalaria* el COS fue mayor en macro agregados, con solamente pequeños aumentos en meso y en micro- agregados (Mutuo *et al.*, 2005).

En otro estudio sobre el almacenamiento de C en suelos en SAF con cacao y en bosque natural en Bahia, Brasil, el sistema de cacao “cabruca”, cacao bajo dosel de bosque natural, tuvo significativamente mayor almacenamiento de C en la fracción de mayor tamaño, a 0–10 cm de profundidad. Los dos sistemas estudiados de SAF con cacao (cacao en cabruca y cacao con el árbol fijador de N, *Erythrina*) tuvieron mayor almacenamiento de C en la fracción de macro-agregados, que en bosque natural. Considerando el bajo nivel de disturbios en el suelo en los sistemas de SAF de cacao, el C contenido en la fracción de macro-agregados es posible que permanezca de manera estable en el suelo. Este estudio muestra el papel importante que pueden cumplir los SAF de cacao en mitigar emisiones de GEI a través de la acumulación y retención de altas cantidades de COS, y sugiere el beneficio de este servicio ambiental para los casi 6 millones de agricultores de cacao del mundo (Gama-Rodrigues *et al.*, 2010).

Efectos del manejo de SAF sobre el COS: café orgánico y convencional

En los SAF bien diseñados y manejados, los árboles asociados pueden proveer suficientes cantidades de biomasa y nutrientes contenidos en ésta como para que no sea necesario el uso de fertilizantes químicos. De esta manera, es factible que el manejo de SAF sea orgánico, con las ventajas que esto puede representar desde el punto de vista económico y ambiental (Montagnini *et al.*, 2011). La diversidad propia de los SAF puede lograr un balance en el cual la incidencia de enfermedades y plagas sea menor de manera que no sea necesario el uso de pesticidas químicos. Los productos de la agricultura orgánica tienden a obtener mejores precios en los mercados locales e internacionales, lo cual muchas

veces compensa por el trabajo o las dificultades involucradas en el cambio hacia un manejo orgánico. El manejo orgánico también puede ser una consecuencia del bajo nivel de ingreso del agricultor, por ejemplo, en Misiones, Argentina, muchos pequeños agricultores que cultivan yerba mate no pueden afrontar el precio de los agroquímicos, con lo cual la asociación con árboles en SAF les ayuda a mantener un sistema de relativamente baja productividad pero de buena sostenibilidad (Montagnini *et al.*, 2011). Con el manejo orgánico a menudo es necesario el uso de enmiendas para el suelo en la forma de compost y otros materiales que tienden a aumentar el COS, con el consiguiente beneficio en términos de la capacidad de estos sistemas de contribuir a la mitigación del cambio climático.

Con el auge reciente de los sistemas de agricultura alternativa, incluyendo los SAF y la agricultura orgánica, han sido desarrollados proyectos para entender y mejorar su manejo, con énfasis en su productividad y servicios ambientales como diversidad y toma de C. Por ejemplo, el CATIE mantiene un proyecto de investigación a largo plazo en su campo experimental desde el año 2000, con el objetivo de diversificar las especies de árboles de sombra en SAF de café, y comparar manejo convencional y orgánico de estos SAF (Sánchez de León *et al.*, 2006; Rossi *et al.*, 2011). Se investigan los efectos del tipo de sombra (3 especies arbóreas y “pleno sol”) y el manejo (diferentes niveles de intensidad en sistema orgánico y convencional, o químico) sobre diversos parámetros tales como la productividad del café, biodiversidad, incidencia de plagas, y efectos sobre la fertilidad de los suelos. Los tratamientos experimentales fueron definidos como la combinación de dos factores: tipo de sombra y prácticas de manejo.

El experimento tiene un total de 9,2 ha, en tres bloques al azar. La densidad de plantación fue de 5000 arbustos de café/ha; a 2 x 1 m. La densidad de los árboles de sombra fue de 417 árboles/ha; plantados a 6 x 4 m, en hileras alternadas. Las especies para sombra fueron: *Chloroleucon eurycyclum*, Barneby & J.W. Grimes, Fabaceae; *Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell, Combretaceae, y *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, Fabaceae. El manejo convencional es basado en recomendaciones del Instituto del Café de Costa Rica e incluye un conjunto de fertilizantes químicos, fungicidas y plaguicidas diseñado para maximizar la productividad a pleno sol, implementado con dos niveles de intensidad: intenso (800 kg/ha/año) y moderado (400 kg/ha/año). El manejo orgánico incluye también dos niveles de intensidad: intenso (20 t ha/año de pulpa de café, 7,5 t ha/año de gallinaza, 200 kg/ha/año de mezcla de potasio-magnesio-sulfato [KMAG], y 200 kg/ha/año de mineral de fosfato) y moderado, con la mitad de esas cantidades. Estas prácticas y niveles fueron establecidos de acuerdo a criterios comúnmente utilizados por agricultores locales.

Entre los numerosos sub-proyectos de este experimento del CATIE, se han realizado investigaciones el COS, en las fracciones gruesa y fina, cuando estos SAF experimentales tenían 8 años de edad (Cowart, 2011). Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos de sombra y manejo orgánico, en comparación con manejo convencional con el café a pleno sol (Cuadro 2). Se encontró una correlación positiva entre el manejo y el % de

Cuadro 2. Porcentaje de carbono total del suelo a los 30 cm de profundidad, en SAF de café y en café bajo sol según especie de árbol para sombra y tipo de manejo, en experimento en CATIE, Turrialba, Costa Rica. Las diferencias entre promedios son estadísticamente significativas cuando éstos están seguidos por letras diferentes, según prueba de Tukey, $p < 0.05$.

Tratamiento		% Carbono Total	
Especie de árbol	Manejo	Promedio	Error estándar
C. eurycyclum	Convencional moderado	5,317b	0,178
	Orgánico intensivo	6,720a	0,290
	Convencional intensivo	5,440b	0,845
E. poeppigiana	Convencional moderado	5,600b	0,244
	Orgánico intensivo	6,770a	0,450
	Convencional intensivo	4,917b	0,303
T. amazonia	Convencional moderado	5,540b	0,875
	Orgánico intensivo	6,453a	0,437
	Convencional intensivo	5,573b	0,403
Pleno sol	Convencional moderado	5,900a	0,800

Fuente: Cowart, 2011.

C total ($p = 0,044$), así como entre el manejo y el % de C en la fracción gruesa del suelo ($p = 0,000$). Esto señaló una tendencia fuerte de aumento en el % de C total, y en el C de las fracciones gruesas y finas, cuando el manejo cambiaba de convencional intensivo, pasando por convencional moderado y llegando a orgánico intensivo. Por otro lado, la especie de árbol de sombra no se correlacionó positivamente con las variables indicadas de % de COS, lo cual sugiere que el efecto del manejo sobre el COS puede relacionarse más con el tipo de enmiendas orgánicas utilizado, que con las especies de sombra que se investigaron en este experimento.

Un menor uso de fertilizantes y herbicidas, con el aumento de insumos orgánicos resultaron en un aumento en el COS, especialmente en la fracción gruesa (Cowart, 2011). Estos resultados indican el potencial del manejo orgánico de los SAF para contribuir al aumento de la materia orgánica del suelo, lo que provee numerosos beneficios al suelo al mismo tiempo que contribuye a reducir los niveles de C atmosférico.

CONCLUSIONES

En los SAF, el diseño tiende a proveer ventajas con respecto a la adaptación al cambio climático, ya que bajo la sombra del árbol en promedio se puede lograr por lo menos 2°C de disminución de la temperatura del aire en comparación con un sitio abierto. Los SAF promueven estrategias de resistencia para la adaptación a la variabilidad climática con la diversificación propia de estos sistemas, lo cual disminuye los riesgos del agricultor y le da más flexibilidad para cambiar hacia especies o variedades mejor adaptadas a las nuevas condiciones. Los SAF en general si están bien diseñados y manejados promueven aumentos de la productividad, a corto y largo plazo, así como de la calidad en el caso del café, y de algunos productos orgánicos.

La contribución de los SAF a la mitigación puede ser substancial cuando se considera la toma de C de las partes aéreas del sistema y del suelo y raíces. Los SAF bien implementados y manejados pueden tener tasas de acumulación de C elevadas, y ser una herramienta efectiva para la M del CC. Los SAF tienen el beneficio adicional de proveer productos valiosos, alimentos y servicios ambientales y sociales.

Una ventaja adicional de los SAF con respecto a la mitigación, es que pueden evitar la deforestación al proveer productos maderables y no maderables en tierras ya deforestadas. En este sentido se convierten en una herramienta importante para los programas de REDD+.

El diseño y manejo de SAF juegan un papel importante en la cantidad de C absorbido en biomasa. Los SAF con cultivos perennes tienen mayor potencial para la toma de C que los SAF con cultivos anuales. Cuando son bien diseñados y manejados, los SSP pueden compensar emisiones de GEI y hasta convertirse en sistemas de C neutral.

Dependiendo de la región del mundo de que se trate, los suelos pueden acumular mayor cantidad de C que la biomasa aérea, y su papel debe ser evaluado usando las metodologías adecuadas en cuanto a profundidad de muestreo y fraccionamiento del C.

En el contexto de proyectos REDD+, mercados de C y programas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA), el C es un producto adicional que los agricultores pueden considerar al tomar decisiones de manejo o de usos alternativos de la tierra (Montagnini y Finney, 2011). Esto puede cambiar la dinámica de los SAF, en cuanto a edad de cosecha de los árboles, combinaciones de cultivos con árboles, especies, silvicultura y otras prácticas de manejo. Con los pagos por C, SAF que de otra manera son menos lucrativos se vuelven más atractivos, o viceversa. Programas de compensación tales como el PSA tienen un papel importante en promover sistemas de uso y manejo de la tierra que neutralicen emisiones de GEI y que asimismo contribuyan a mantener las formas de vida de las poblaciones humanas.

Existen tendencias a nivel mundial en sectores productivos, de desarrollo, y ambientales, que abren nuevas oportunidades para los SAF para que sean utilizados como herramientas de AyM de CC (www.fao.org/climatechange/climate-smart). Numerosos programas gubernamentales y privados tienden a promover cambios de agricultura convencional hacia usos de la tierra productivos, sostenibles y de bajos insumos tales como SAF. Políticas a nivel internacional actualmente favorecen sistemas de producción alternativos tales como SAF, afirmando la importancia de los SAF en la diversificación de la producción, en moderar variables del microambiente, y en almacenar C en biomasa y suelos.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue presentado en las Jornadas Técnicas Científicas 25 Aniversario Fundación Danac, San Felipe, Yaracuy, Venezuela, 25 de Noviembre, 2011. Se agradece a todo el personal de Danac por su amable invitación y por todo el apoyo prestado durante el evento.

REFERENCIAS

- Afanador Ardila, A. 2008. Climate change adaptation in Latin American agriculture. Are agroforestry systems an alternative? MS Thesis. Yale University, School of Forestry and Environmental Studies, New Haven, CT, USA. 36 pp.
- Andrade, H. J.; R. Brook; M. Ibrahim. 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant Soil* 308:11–22.
- Barahona, R.; M. Theodorou; C. Lascano; E. Owen; N. Narvaez. 2003. In vitro degradability of mature and immature leaves of tropical forage legumes differing in condensed tannin and non-starch polysaccharide content and composition. *J. Sci. Food and Agric.* 83 (12):1256 – 1266.
- Beer, J.; A. Bonnemann; W. Chavez; H. W. Fassbender; A. C. Imbach; I. Martel. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. V. Productivity indices, organic material models and sustainability over ten years. *Agroforest. Syst.* 12: 229–249.
- Cowart, M. 2011. Shade and management effects on soil carbon fractions in organic and conventional coffee agroforestry systems in Costa Rica. MSthe-sis. Yale University, School of Forestry and Environmental Studies, 195 Prospect St., New Haven, CT, USA. 18pp.
- Gama-Rodrigues, E. F. ; P. K. R. Nair; V. D. Nair; A. C. Gama-Rodrigues; Virupax C. Baligar; R. C. R. Machado. 2010. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environ. Manage.* 45:274–283.

- GAMMA. 2010. Balance de gases efecto invernadero en fincas ganaderas de la región Chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad. Reporte final. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00202.pdf>. [Consultado: junio 2010].
- Ibrahim, M.; M. Chacón; C. Cuartas; J. Naranjo; G. Ponce; P. Vega; F. Casasola; J. Rojas. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforest. Amér.* 45: 27-36.
- Ibrahim, M.; L. Guerra. 2010. Análisis preliminar de los sistemas silvopastoriles para el diseño de fincas ganaderas Carbono neutral. En: Ibrahim, M. y E. Murgueitio (Eds.). VI Congreso Internacional de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en territorios ganaderos. Resúmenes. Turrialba, Costa Rica: CATIE; CIPAV. 160 p. Serie técnica. Reuniones técnicas, CATIE N° 15. p. 28.
- Ibrahim, M.; D. Tobar; L. Guerra; C. Sepúlveda; N. Ríos. 2010. Balance de gases efecto invernadero en fincas ganaderas de la región Chorotega. En: Ibrahim, M. y E. Murgueitio (Eds.). Congreso Internacional de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible (6°: 2010: Panamá, Panamá). Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en territorios ganaderos. Resúmenes. 1ª ed. Turrialba, Costa Rica: CATIE; CIPAV. 160 p. Serie técnica. Reuniones técnicas, CATIE N°15. p. 27.
- Ibrahim, M.; F. Casasola; C. Villanueva; E. Murgueitio; E. Ramírez; J. Sáenz; C. Sepúlveda. 2011. Payment for Environmental Services as a tool to encourage the adoption of silvo-pastoral systems and restoration of agricultural landscapes dominated by cattle in Latin America. In Montagnini, F. and C. Finney (Eds.). Restoring degraded landscapes with native species in Latin America. Nova Science Publishers. New York. pp. 197-219
- IPCC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Uses. H. S. Eggleston; L. Buendia; K. Miwa; T. Ngara; K. Tanabe (Eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan. Disponible en: <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>.
- Jarvis, A.; J. Ramírez; P. Laderach. 2010. Desafíos para la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario y las oportunidades para la adopción de sistemas silvopastoriles. En: Ibrahim, M. y E. Murgueitio (Eds.). Congreso Internacional de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible (6°: 2010: Panamá, Panamá). Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en territorios ganaderos. Resúmenes. 1ª ed. Turrialba, Costa Rica: CATIE; CIPAV. 160 p. Serie técnica. Reuniones técnicas, CATIE N° 15. p. 5.

- Koskela J.; P. Nygren; F. Berninger; O. Luukkanen. 2000. Implications of the Kyoto Protocol for tropical forest management and land use: prospects and pitfalls. *Trop. Forestry Reports* 22. University of Helsinki, Department of Forest Ecology. Helsinki. 103 pp.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lal, R. 2005. Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *In*: F. Montagnini (Ed.). *Environmental Services of Agroforestry Systems*. Haworth Press, New York. pp. 1-30.
- Mendelsohn, R.; A. Dinar. 1999. Climate change, agriculture, and developing countries: does adaptation matter? *The World Bank Research Observer* 14: 277-293.
- Montagnini, F.; L. Preveti; L.A. Thrupp; J. Beer; R. Borel; G. Budowski; L. Esponzoza; J. Heuveldop; C. Reiche; R. Russo; R. Salazar; H. Alfaro; F. Rojas; F. Berstch; F. Fernandes; M. González; R. Alvim; M.D. Shahezaman; D. Nichols. 1992. *Sistemas agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos*. 2da. ed. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica. 622 pp.
- Montagnini, F.; P. K. Nair. 2004. Carbon Sequestration: An under-exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agrofor. Syst.* 61: 281-295.
- Montagnini, F. 2008. Management for sustainability and restoration of degraded pastures in the Neotropics. *In*: R. Myster (Ed.), *Post-agricultural succession in the Neotropics (265-295)*. New York, New York: Springer.
- Montagnini, F. 2011. Restoration of degraded pastures using agrosilvopastoral systems with native trees in the Neotropics. *In*: Montagnini, F.; W. Francesconi; E. Rossi (Eds.). *Agroforestry as a tool for landscape restoration*. Nova Science Publishers, New York. pp. 55-68.
- Montagnini, F.; C. Finney. 2011. Payments for Environmental Services in Latin America as a tool for restoration and rural development. *Ambio* 40: 285-297.
- Montagnini, F.; D. Piotta. 2011. Mixed plantations with native trees on abandoned pasture lands: restoring productivity, ecosystem properties and services in a humid tropical site. *In*: S. Günter; M. Weber; B. Stimm; R. Mosandl (Eds.). *Silviculture in the tropics*. Springer, Berlin-New York. pp. 501-511.
- Montero, M.; F. Montagnini. 2005. Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies forestales nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Rec. Nat. y Ambiente (Costa Rica)* 45: 118-125.

- Murgueitio, R. E.; B. Solorio. 2008. El Sistema Silvopastoril Intensivo, un modelo exitoso para la competitividad ganadera en Colombia y México. En: Memorias del V Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. Diciembre 1 - 5 de 2008. Maracay, Venezuela. INIA, Universidad Rómulo Gallegos y AVPA.
- Murgueitio, E.; M. Ibrahim. 2009. Ganadería y medio ambiente en América Latina. En: Murgueitio, E.; C. Cuartas; J. Naranjo (Eds.). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. 2da. Ed. Fundación CIPAV. Cali, Colombia. p. 20-39
- Murgueitio, E.; C. Cuartas; J. Naranjo (Eds.). 2009. Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. 2da. Ed. Fundación CIPAV. Cali, Colombia. 490 p.
- Murgueitio, E.; Z. Calle; F. Uribe; A. Calle; B. Solorio. 2011. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *For. Ecol. Manage.* 261: 1654-63.
- Muschler, R.G. 2001. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agrofor. Syst.* 85: 131-139.
- Mutuo, P. K.; G. Cadisch; A. Albrecht; C. A. Palm; L. Verchot. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutr. Cycl. in Agroecosyst.* 71: 43-54.
- Nair, P. K. R.; B. M. Kumar ; V. D. Nair. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172:10-23.
- Nair, P. K. R.; V. D. Nair; B. M. Kumar; J. M. Showalter. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv. Agron.* 108: 237-307.
- Nair, P. K. R. 2011. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agrofor. Syst.* Published online (September 5, 2011) 10.1007/s10457-011-9434-z
- Pinto, H.S.; E. D. Assad; J. Zullo Jr; O. Brunini. 2002. O aquecimento global e a agricultura. *Mudanças Climáticas. Com. Ciência* 34, August 2002. Disponible en: <http://www.comciencia.br/>.
- Piotto, D.; D. Craven; F. Montagnini; F. Alice. 2010. Silvicultural and economic aspects of pure and mixed native tree species plantations on degraded pasturelands in humid Costa Rica. *New For.* 39: 369-385.
- Rainforest Alliance. 2009. Guidance on coffee carbon project development using the simplified agroforestry methodology. Disponible en: http://www.theredddesk.org/sites/default/files/resources/pdf/2010/rainforest_alliance_coffee_carbon_guidance_v2_august_09.pdf. Consultado June 5, 2011.

- Rossi, E.; F. Montagnini; E. De Melo. 2011. Effects of different management practices on coffee productivity and herb diversity in agroforestry systems in Costa Rica. *In: Montagnini, F.; W. Francesconi; E. Rossi (Eds.). Agroforestry as a tool for landscape restoration. Nova Science Publishers, New York.. pp.115-132.*
- Sánchez-de León, Y.; E. De Melo; G. Soto; J. Johnson-Mayanard; J. Lugo-Pérez. 2006. Earthworm populations, microbial biomass and coffee production in different experimental agroforestry management systems in Costa Rica. *Caribb. J. Sci.* 42: 397-409.
- Solórzano, N; E. Arends; E. Escalante. 1998. Efectos del saman (*Samanea saman* (Jacq.) Merrill) sobre la fertilidad del suelo en un pastizal de estrella (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) en Portuguesa. *Rev. For. Venez.* 42: 149-155.
- Somarriba, E.; J. Beer; J. A. Orihuela; H. Andrade; R. Cerda; F. DeClerck; G. Detlefsen; M. Escalante; L. A. Giraldo; M. A. Ibrahim; L. Krishnamurthy; V. E. Mena; J. R. Mora; L. Orozco; M. Scheelje; J. J. Campos. 2012. Mainstreaming agroforestry in Latin America. *In: Nair, P.K.R.; D. P. Garrity (Eds.). Agroforestry: The future of global land use. Springer, The Netherlands (in press).*
- Soto-Pinto, L.; I. Perfecto; J. Castillo-Hernández; J. Caballero-Nieto. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agric. Eco. Environ.* 80: 61-69.
- Steinfeld, H.; P. Gerber; T. Wassenaar; V. Castel; M. Rosales; C. de Haas. 2006. Livestock's long shadow. Environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Verchot, L. V.; M. Van Noordwijk; S. Kandji; T. Tomich; C. Ong; A. Albrecht; J. Mackensen; C. Bantilan; K. V. Anupama; C. Palm. 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Global Change* 12:901-918.
- Waghorn, G. D. 2008. Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production-Progress and challenges. *Animal Feed Sci. Tech.* 174:116-139.
- Wightman, J. 2007. Production and mitigation of greenhouse gases in agriculture. *In: Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses.* Disponible en: <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/IV.1GHGs.pdf>. Consultado 1 Noviembre 2010.
- World Bank. 2010. Mainstreaming Sustainable Cattle Ranching. The world Bank, Washington, EUA. Disponible en: <http://web.worldbank.org/external/projectsmain?Projectid=P104687&theSitePK=40941&piPK=64290415&pagePK=64283627&menuPK=64282134&Type=Overview>. Consultado 1 Noviembre 2010.