



Interciencia
ISSN: 0378-1844
interciencia@ivic.ve
Asociación Interciencia
Venezuela

Roncal-García, Sandra María; Soto-Pinto, Lorena; Castellanos-Albores, Jorge; Ramírez-Marcial, Neptalí; de Jong, Bernardus H.J.

Sistemas agroforestales y almacenamiento de Carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México

Interciencia, vol. 33, núm. 3, marzo, 2008, pp. 200-206

Asociación Interciencia
Caracas, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933308>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

SISTEMAS AGROFORESTALES Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN COMUNIDADES INDÍGENAS DE CHIAPAS, MÉXICO

Sandra Roncal-García, Lorena Soto-Pinto, Jorge Castellanos-Albores, Neptalí Ramírez-Marcial y Bernardus de Jong

RESUMEN

Una consecuencia de la agricultura de roza-tumba-quema (*r-t-q*) es la conversión de áreas boscosas a sistemas agrícolas. Esta práctica contribuye a la deforestación, el deterioro de los suelos, a las emisiones de carbono (C) y, por lo tanto, al efecto invernadero. El objetivo de este estudio fue evaluar los reservorios de C en cultivos de maíz tradicionales y en sistemas agroforestales (*taungya*, barbechos o *acahuales* naturales y enriquecidos), y explorar su relación con la edad y su complejidad funcional y estructural. En el marco del proyecto *Scolel'te* se realizaron inventarios en 25 parcelas circulares en cuatro comunidades indígenas del municipio de Chilón, Chiapas, México, usando métodos destructivos para la estimación de C, a excepción de árboles, juveniles y raíces gruesas,

para los cuales se emplearon fórmulas alométricas. Una mayor complejidad de los sistemas derivó en mayor acumulación de carbono. *Taungya*, milpa, barbecho enriquecido y natural presentaron 109,4; 127,9; 150,1 y 177,6 Mg C·ha⁻¹, respectivamente. La materia orgánica del suelo fue el mayor reservorio (70% del C total en todos los sistemas); la biomasa viva y materia orgánica muerta aportaron un tercio del C total. El C total mostró incremento con la edad del sistema en *taungya* y barbecho natural, mientras que en la milpa se encontró una relación negativa entre materia muerta y edad. Los sistemas *taungya* y barbecho enriquecido pueden reducir los ciclos de *r-t-q*, ofrecer el servicio ambiental de captura de C y producir bienes para la población local.

AGROFORESTRY SYSTEMS AND CARBON STOCKS IN INDIGENOUS COMMUNITIES FROM CHIAPAS, MEXICO

Sandra Roncal-García, Lorena Soto-Pinto, Jorge Castellanos-Albores, Neptalí Ramírez-Marcial and Bernardus de Jong

SUMMARY

One of the consequences of slash-and-burn agriculture is the conversion of forests into open areas, contributing carbon (C) emissions and consequently increasing the greenhouse effect. The aim of this study was to evaluate the C stocks in four agroforestry systems, exploring its relationship with system age and structural and functional complexity. Carbon inventories were undertaken, in the context of the *Scolel'te* Project, in four indigenous communities within the Chilón municipality, Chiapas, Mexico, in 25 circular plots. Destructive sampling methods were used for all pools, except for tree/shrub and thick roots, for which allometric formulae were used. The Holdridge complexity index was applied to each system. Plots with higher complexity contained a higher carbon concentration.

Taungya systems, traditional milpa, enriched fallow and natural fallow presented 109.4, 127.9, 150.1 and 177.6 Mg C·ha⁻¹, respectively. Soil organic matter was the largest C pool in all systems, with 70% of the total C stock; whereas living biomass and dead organic matter contributed one third of total C. Total C increased with system age in *taungya* and natural fallow, while in milpa a negative relationship between dead matter and age was found. *Taungya* and enriched fallow may be regarded as an alternative for slash and burn agriculture, since in addition to C sequestration, farmers do not burn vegetation, thus avoiding emissions. These agroforestry systems hold significant pools of C and also offer key local goods for local people.

Introducción

El volumen de las emisiones de CO₂ se ha incrementado 3,5 veces en los últimos 50 años

por el uso de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio de uso del suelo (Alegre y Cassel, 1996; Brown, 1996; IPCC, 2001).

Se estima que a mediados del siglo XXI las emisiones de CO₂ alcanzarán 6,2 billones de Mg por año, lo que provocarán incrementos de la

temperatura entre 1,5 y 4,5°C (IPCC, 2001). En una proyección desde el año 1995 al 2050, se estimó que la silvicultura y la agroforestería a

PALABRAS CLAVE / Acahual / Barbecho / Carbono / Índice de Complejidad de Holdridge / Milpa / Taungya /

Recibido: 18/12/2006. Modificado: 17/01/2008. Aceptado: 22/01/2008.

Sandra María Roncal-García. Ingeniera Forestal, Universidad Nacional de Ucayali, Perú. Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Chiapas, México. Evaluadora de Estudios de Impacto Ambiental, OGATEIRN-INRENA, Lima, Perú. e-mail: sandy_roncal@yahoo.es

Lorena Soto-Pinto. Bióloga, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales Renovables, CATIE, Costa Rica. Doctora en Ciencias, UNAM, México. Investigadora, ECOSUR, Chiapas, México. e-mail: lsoto@ecosur.mx

Jorge Castellanos-Albores. Biólogo, Universidad Autóno-

ma Metropolitana (UAM-X). Maestría en Ciencias en Ecología y Ciencias Ambientales, y Candidato a Doctor, UNAM, México. Investigador, ECOSUR, Chiapas México. e-mail: jcastell@ecosur.mx

Neptalí Ramírez-Marcial. Biólogo, UNAM, México. Maestro en Ciencias en Botánica, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Doctor en Eco-

logía y Manejo de Recursos Naturales, UNAM, México. Investigador, ECOSUR, Chiapas, México. e-mail: nramirez@ecosur.mx

Bernardus H. J. de Jong. Ingeniero Forestal y Doctor en Ciencias, Universidad de Wageningen, Holanda. Investigador, ECOSUR, Tabasco, México. e-mail: bjong@ecosur.mx

SISTEMAS AGROFLORESTAIS E ESTOQUE DE CARBONO EM COMUNIDADES INDÍGENAS DE CHIAPAS, MÉXICO

Sandra Roncal-García, Lorena Soto-Pinto, Jorge Castellanos-Albores, Neptalí Ramírez-Marcial e Bernardus de Jong

RESUMO

Uma das conseqüências da agricultura de corte-e-queima é a conversão de floresta em áreas abertas, as quais contribuem para a emissão de carbono (C) e conseqüente efeito estufa. O objetivo deste estudo foi avaliar o estoque de C em quatro sistemas agroflorestais, explorando suas relações com sistema antigo e complexidade estrutural e funcional. Esta pesquisa foi desenvolvida dentro do Projeto Scolel'te, em quatro comunidades indígenas no município de Chilón, Chiapas, México. Foram realizados inventários em 25 blocos circulares onde foram tomadas amostras destrutivas, exceto para árvore/arbusto e raízes grossas, nas quais foram usadas fórmulas de estimativa alométrica. O Index de Holdrige foi usado para calcular a complexidade dos sistemas. A maior com-

plexidade derivou em um maior acúmulo de carbono. O Sistema Taungya, a roça tradicional, o pousio enriquecido e o pousio natural, apresentaram 109,4, 127,9, 150,1 e 177,6 Mg C·ha⁻¹, respectivamente. A matéria orgânica do solo obteve o maior estoque de C em todos os sistemas, com 70% do total, entretanto, a biomassa aérea e a matéria orgânica morta, contribuíram com um terço do total de C. Se desfez que O sistema Taungya e o pousio enriquecido podem ser considerados como alternativa para agricultura de corte-e-queima, pois além de seqüestrar C, os agricultores não queimarão a vegetação evitando assim a emissão de C. Esses sistemas agroflorestais absorvem importante quantidade de C e também oferecem benefícios locais para as pessoas.

nivel mundial pueden capturar 38 billones Mg de C, la cual equivaldría entre 11 y 15% del total de las emisiones fósiles emitidas en el mismo período (Brown, 1996).

Los sistemas forestales y agroforestales (SAF) pueden funcionar como sumideros de CO₂ (Winjum *et al.*, 1992; Nair, 1993; Litynski *et al.*, 2006) almacenando en promedio 95 Mg C·ha⁻¹ en zonas tropicales (Albrecht y Kandji, 2003), para un total de 2,1 billones de Mg C por año en estas áreas (Oelbermann *et al.*, 2004). Sin embargo, hay pocos estudios de estimación de C en la parte subterránea (raíces y suelo), mantillo y árboles muertos debido a la complejidad de los sistemas (Brown, 1996, 2002; Vogt *et al.*, 1996).

Acosta (2003) y Esquivel (2005) reportaron que los sistemas agrícolas pueden almacenar entre 86 y 124 Mg C·ha⁻¹. El sistema de barbecho natural puede almacenar entre 14 y 191 Mg C·ha⁻¹ en dos y 25 años, respectivamente (Kotto-Same *et al.*, 1997; Callo-Concha *et al.*, 2001; Acosta, 2003; Esquivel, 2005) y el barbecho enriquecido hasta 60 Mg C·ha⁻¹ en cinco años (Kotto-Same *et al.*, 1997).

En 1994, en Chiapas, México, el proyecto Scolel'te estableció sistemas agroforestales para captura de C (Soto-Pinto *et al.*, 2004). Los sistemas

establecidos fueron: sistemas rotacionales tipo taungya (combinación de cultivo de maíz-frijol-calabaza con árboles maderables, donde el cultivo permanece hasta el cierre del dosel y los árboles hasta su aprovechamiento) y barbechos enriquecidos (árboles maderables cultivados en brechas abiertas entre la vegetación secundaria que se desarrolla después del abandono agrícola). Estimaciones del C que podría secuestrarse en estos sistemas alcanzan 183 y 194 Mg C·ha⁻¹ en 25 años, para taungya y barbechos mejorados, respectivamente (Montoya *et al.*, 1995).

La acumulación de C se atribuye a la edad del sistema (Acosta, 2003; Albrecht y Kandji, 2003), a la estructura y función (Albrecht y Kandji, 2003), al manejo silvícola (Vogt *et al.*, 1996; Albrecht y Kandji, 2003; Scott *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2006) y a las condiciones edáficas como textura e historia de uso del suelo (Esquivel, 2005; Tian *et al.*, 2005; FAO, 2006). Acosta (2003) propuso que el factor determinante en el almacenamiento de C es el tiempo de establecimiento; pero no existe un consenso de cuáles son los factores que afectan la capacidad de los sistemas para almacenar C.

En este estudio se evaluó cómo influye la edad y la complejidad del sistema en

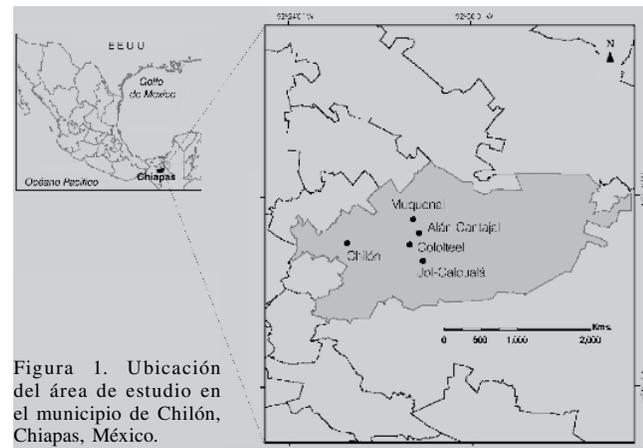


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el municipio de Chilón, Chiapas, México.

los diferentes reservorios de C (biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo), en cuatro localidades de Chiapas, México. Los SAF tradicionales estudiados fueron milpa con árboles (cultivo de maíz tradicional); barbecho natural (vegetación secundaria natural); y dos SAF intervenidos (Taungya y barbecho enriquecido).

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en cuatro localidades del municipio de Chilón, Chiapas: Jol-Cacualá, Cololteel, Muquenal y Alan Cantajal (Figura 1). Estas comunidades se encuentran (García, 1973) en un clima cálido a semi-cálido húmedo (A) C (m), con una altitud promedio de

1000m, precipitación pluvial media anual de 3087mm y temperatura media anual de 24°C. Los suelos se clasifican como Regosoles (FAO, 1995). Los tipos de vegetación corresponden a bosque mesófilo de montaña y selva mediana perennifolia (INEGI, 1984), pero las parcelas de estudio estuvieron ubicadas en la zona de bosque mesófilo. La zona de estudio se localizó entre 17°3'21" y 17°8'29,7"N y entre 92°4'41,8" y 92°8'32"O. Las cuatro comunidades pertenecen a la etnia Tzeltal y tienen como actividad económica principal la producción de maíz, frijol y frutas (INEGI, 2000). Participan desde 1996 en el proyecto Scolel'te a través del cual reciben \$12 USD por tonelada de C capturada en un mercado voluntario, de

parte del Fideicomiso Fondo Bioclimático, con patrocinio de la FIA (Federación Internacional de Automóviles, Fórmula Uno), Future Forest (ONG de Edimburgo; RU) y la Catedral de Guadalajara, México, y administrado por la Cooperativa Ambio.

Materiales y Métodos

Selección de sistemas agroforestales (SAF)

Con base en un reconocimiento previo del área de estudio se seleccionaron parcelas tradicionales: milpa tradicional con árboles (1-7 años) y barbecho natural (3-50 años), y sistemas intervenidos diseñados participativamente por científicos del proyecto Scolel'te: taungya (5-9 años); y barbecho enriquecido de 5-9 años (De Jong *et al.*, 1995).

La milpa tradicional con presencia de árboles es un sistema donde se cultiva maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita pepo* L.). Se establece con el sistema de roza-tumba-quema (r-t-q) o roza-quema (r-q), dejando descansar el terreno por 3-15 años. Los productores toleran árboles de la vegetación natural y cultivan algunas plantas perennes y semiperennes con densidades promedio de 210 árboles por ha, los cuales favorecen la sucesión secundaria y tienen múltiples usos. Las especies más comunes son *Heliocarpus appendiculatus* Turcz., *Musa sapientum* L., *Cecropia peltata* L. y *Viburnum hartwegii* Benth.

El barbecho natural corresponde a la vegetación natural derivada de la sucesión secundaria en diferente grado de madurez, que se establece después del cultivo agrícola por un período de 3-15 años, con una densidad promedio de 938 árboles por ha. Entre las especies dominantes destacan *Trichospermum mexicanum* (DC) Baill., *Hedyosmum mexicanum* C. Cordem., *Viburnum hartwegii* y *Heliocarpus* sp.

El sistema taungya es un sistema rotacional donde se

cultiva maíz por un período de 2-7 años, al tiempo que se plantan árboles comerciales como el cedro (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia microphylla* King), *Tabebuia* sp. y *Ceiba* sp., los cuales permanecen como una plantación hasta el primer turno, quedando al final aproximadamente 540 árboles por ha.

En el sistema de barbecho enriquecido se plantan árboles comerciales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *Cupressus lusitanica* Mill. en la zona subtropical, y *C. odorata*, *S. macrophylla*, *Tabebuia* sp. y *Ceiba* sp. en la zona tropical, en brechas intercaladas con la vegetación secundaria, quedando después de aplicar el raleo, al igual que en taungya, una densidad de aproximadamente 1050 árboles por ha.

Se aplicó una entrevista semi-estructurada a 24 agricultores, con la finalidad de conocer la estructura y función, las prácticas de manejo y productos de cada sistema estudiado.

Características de los SAF

Para describir la complejidad de los SAF se usó el índice de complejidad de Holdridge (ICH), un indicador de la fisonomía del sistema que combina información estructural y riqueza de especies (Kalacska *et al.*, 2004) y está dado por $ICH = HGDS / 1000$, donde ICH: índice de complejidad de Holdridge (sin unidades), H: altura promedio de los árboles (m), G: área basal (suma del área de los tallos en pie por superficie), D: densidad de los árboles (número de árboles por superficie), y S: riqueza de especies.

Para conocer la composición de especies se estimó la importancia ecológica de las mismas por medio del índice de valor de importancia (IVI: Müller-Dombois y Ellenberg, 1974). Como indicador de la frecuencia de uso del suelo con respecto a los períodos de barbecho y el potencial de recuperación del sitio se estimó el índice de intensidad de uso (IUS, Young, 1994), dado por

$IUS(\%) = (UA \times 100) / (UA + PD)$, donde UA es el tiempo de uso agrícola (años) y PD el período de descanso (años de barbecho o acahual).

Evaluación de los reservorios de carbono

Se midieron la altura y el diámetro de los árboles y arbustos vivos y muertos >10cm de diámetro a 1,3m a altura del pecho (d.a.p) en círculos de 1000m², y juveniles de 2-9,9cm d.a.p en círculos de 100m² dentro de la parcela de 1000m². Se colectaron ejemplares botánicos para su identificación hasta especie, los cuales se depositaron en el Herbario de El Colegio de la Frontera Sur (CH). La biomasa de los árboles vivos y muertos se estimó mediante ecuaciones alométricas generales basadas en el diámetro, altura y densidad de la madera (Chave *et al.*, 2005) para especies latifoliadas del bosque tropical húmedo. Otras fórmulas alométricas específicas se usaron para árboles muertos, plantas de café y banano (Frangi y Lugo, 1985; Márquez, 2000; ICRAF, 2001). Se empleó información sobre la densidad de madera de las especies conocidas y para las desconocidas se empleó el factor de 0,6 (Brown, 1997). Para las estimaciones del C contenido en el componente arbóreo se consideró el 50% de la biomasa seca (IPCC, 2003).

Para determinar el almacenamiento de C en los componentes herbáceo, mantillo, raíces finas y plantas de maíz en la parcela de 1000m² se emplearon métodos destructivos. Las ramas caídas en el suelo (3cm de diámetro) fueron evaluadas en dos segmentos de cuerda de 50m cada uno, colocados perpendicularmente y cruzando el centro de la parcela. El volumen de las ramas caídas en la parcela se estimó por el método de intersección planar propuesto por Van Wagner, citado por Brown y Rousopoulos (1974). Se colectaron muestras de madera en tres

estados: sólida, intermedia y podrida. Las herbáceas fueron colectadas en 16 cuadros de 0,25m² distribuidos al azar, e igualmente el mantillo en cuatro círculos de 20cm de diámetro. Las raíces finas se colectaron en cuatro núcleos de suelo a 30cm de profundidad mediante un cilindro de muestreo de 4,21cm de diámetro interno. La masa de raíces finas de <0,5mm fue separada del suelo manualmente con la ayuda de pinzas y lentes de aumento cuando el suelo estaba aun húmedo y posteriormente lavadas (Castellanos *et al.*, 1991). La biomasa de raíces gruesas fue estimada con la ecuación alométrica para bosques tropicales basada en la biomasa arbórea y la edad (Cairns *et al.*, 1997). En las parcelas del sistema milpa se cosechó la biomasa total de 10 plantas de maíz seleccionadas de forma aleatoria y se estimó la densidad de siembra entre matas (1 mata= 4 plantas). La muestra de maíz se conformó por hojas, tallos y raíces. Las muestras vegetales fueron secadas en una estufa a 60°C por 1-5 días, dependiendo del tipo de material; solo la hojarasca fue secada al ambiente por siete días. Luego, las muestras fueron pesadas y molidas para la determinación del C total (C_{tot}) por el método de combustión seca, mediante un autoanalizador LECO CHN 1000® (Anderson e Ingram, 1993).

Para los análisis de suelo, y usando una barrena se colectaron cuatro muestras a profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30cm, las que se mezclaron para formar muestras compuestas por parcela y profundidad. Las muestras fueron secadas en un invernadero por siete días, molidas y tamizadas con malla 10 para estimar la densidad aparente mediante el método de la probeta y con malla 40 para la determinación de C_{tot} a través de un autoanalizador de C. Para las muestras con pH>7 se empleó el método Walkley-Black por combustión húmeda (MacDicken, 1997) para determinar la fracción de C orgánico.

La materia orgánica del suelo (MOS) fue calculada con la ecuación propuesta por IPCC (2003), en base a la densidad aparente, el porcentaje de C y la profundidad. El C_{tot} de cada sistema en pie se estimó con el método del IPCC (2003). Los reservorios de C se agruparon en tres componentes: a) biomasa viva que incluyó árboles y arbustos, herbáceas, raíces gruesas y finas; b) materia orgánica muerta (MOM) constituida por árboles y arbustos muertos, ramas caídas y mantillo; y c) MOS contenida en el suelo a profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30cm. Todas las mediciones se realizaron en época de secas.

El promedio de C en la masa arbórea viva fue ponderado por el número promedio de árboles por parcela. Los datos obtenidos fueron transformados a su logaritmo natural en los casos donde no se cumplieron los supuestos de normalidad. Posteriormente, se corrió un análisis de correlación y de regresión lineal múltiple de pasos sucesivos para encontrar relaciones entre las variables dependientes (reservorios de C en biomasa viva, MOM y MOS) y las variables independientes (edad, ICH e IUS). Los análisis se efectuaron con el paquete estadístico SPSS versión 11.

Resultados

Características de los SAF

Milpa tradicional con árboles. Los agricultores cultivan un área promedio de 0,5ha. El sistema productivo abarca ciclos agrícolas de 3-7 años y períodos de barbecho hasta de 15 años. Frecuentemente, el barbecho dura solamente 4 años; aquellos agricultores que no cuentan con más terrenos practican una agricultura intensiva y permanente. En la zona de estudio se producen dos ciclos de maíz al año: milpa de tornamil (diciembre-abril) y de temporal o verano (mayo-diciembre). En la milpa se cultiva maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), calabaza (*Cucurbita pepo*),

TABLA I
CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES
DE LOS CUATRO SISTEMAS AGROFORESTALES EVALUADOS
EN EL MUNICIPIO DE CHILÓN, CHIAPAS MÉXICO

SAF (edades en años)	Altura (m)	Área basal (m ² ·ha ⁻¹)	Densidad de árboles (por ha)	Número de especies	Índice de complejidad*
Milpa (1-7)	2,90	4,49	210,00	5,13	0,53 ± 0,97
Taungya (5-9)	6,93	8,49	541,43	6,57	2,58 ± 2,95
Acahual enriquecido (5-9)	6,85	10,00	1058,00	12,80	11,04 ± 12,83
Acahual natural (3-50)	7,75	19,51	937,50	16,50	34,22 ± 34,91

* Media ± intervalo de confianza 95%

chile (*Capsicum annuum* L.) y ocasionalmente se mezcla café (*Coffea arabica* L.). El maíz es el principal cultivo, sembrado a distancias de 1,5m entre matas, obteniendo rendimientos por ciclo de 1ton·ha⁻¹ de maíz, 0,4ton·ha⁻¹ de frijol, además de leña, hierbas comestibles (quelites) y frutas para autoabasto y/o comercialización local. Algunos árboles y arbustos que emergen espontáneamente en la milpa se conservan para reducir el tiempo de la sucesión secundaria, mejorar la fertilidad del suelo, proveer de leña y servir como guía para las especies trepadoras (por ej. frijol). La densidad de árboles encontrada en la milpa fue de 210 ± 178,75 individuos por ha, con una altura de 2,9 ± 0,85m y diámetro de 14,1 ± 2,6cm. Este sistema tradicional tiene un arreglo temporal coincidente y espacialmente disperso; donde se registraron 23 especies representadas por 144 individuos en un área de 8000m². Las especies con mayor índice de valor de importancia (IVI) fueron *Heliocarpus appendiculatus*, *Musa sapientum* y *Cecropia peltata*. El ICH fue 0,5 ± 1,0 (Tabla I).

Taungya. Este sistema se estableció durante los años 1997 a 2001 en parcelas con uso anterior de maíz. La densidad promedio del maíz fue de 3114 matas por ha. El principal manejo de los árboles es la poda en los meses de marzo y abril para permitir la entrada de luz al cultivo agrícola; se poda durante los primeros cinco años de establecimiento. El manejo del cultivo

de maíz es similar al descrito para la milpa tradicional. Se conforma por árboles, arbustos y cultivos agrícolas, con arreglo concomitante y en hileras. La densidad de árboles es de 600 ± 258,87 individuos por ha, diámetro y altura de 12 ± 3,9cm y 7 ± 2,30m, respectivamente. El 34% del total de árboles fueron sembrados, el resto son árboles y arbustos de la sucesión secundaria. En el inventario se registraron 28 especies, representadas por 359 individuos, en un área de 7000m². Las especies con mayor valor de importancia fueron *Cedrela odorata* (34%), *Inga micheliana* Harms (12%) y *Heliocarpus appendiculatus* (6%). El sistema taungya reportó un ICH de 2,58 ± 3,0 (Tabla I). Se producen cultivos agrícolas, verduras, frutas y leña como producto de podas-raleos de los árboles plantados y la madera podría aprovecharse en los próximos 11-15 años.

Barbecho enriquecido. Los barbechos enriquecidos ocupan un área promedio de 1ha por productor. El uso del suelo anterior puede ser el pastoreo, el cultivo de maíz, el barbecho o acahual natural o cafetal. Las prácticas silviculturales (deshierbe, podas y raleos) se hicieron en los primeros cinco años de la plantación. Los componentes del sistema fueron árboles, arbustos y herbáceos, con un arreglo temporal separado y espacial en hileras. El principal componente fue el arbóreo con una densidad de 1058 ± 594 árboles por ha, diámetro y altura de 14,7 ± 4,2m y 7,8 ± 1,0cm, res-

pectivamente. En este sistema se plantaron en promedio 92 árboles por ha, equivalentes al 9% del total de árboles en la parcela. Se encontraron 36 especies representadas por 411 individuos en un área de 5000m². Las especies con mayor valor de importancia fueron *Pinus oocarpa* (11%), *Saurauia villosa* DC. (9%) y *Heliocarpus appendiculatus* (9%). Este sistema reportó un ICH de 11,0 ± 12,8 (Tabla I). Además de proveer los productos descritos para el barbecho natural, proporciona leña de las podas, postes de los raleos y madera comercial en los próximos 11-15 años.

Barbecho natural. Este sistema corresponde a la vegetación secundaria que se establece después del abandono agrícola por un período de 3-15 años, para recuperar la fertilidad del suelo. Los componentes del sistema son árboles, arbustos y herbáceos con un arreglo temporal separado bajo un manejo extractivo. El principal componente es el arbóreo con una densidad de 938 ± 480 árboles por ha, diámetro de 10 ± 4,2cm y altura de 7 ± 1,6m. El inventario florístico levantado en un área de 8000m² reportó 54 especies y 722 individuos. Las especies dominantes fueron *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baillon (10%), *Hedyosmum mexicanum* Cordemoy (8%) y *Viburnum hartwegii* Benth. (7%) representando el 25% del IVI del sistema. El ICH fue de 34,2 ± 34,9 (Tabla I). El barbecho natural provee de diversos productos maderables, frutas cultivadas y silvestres,

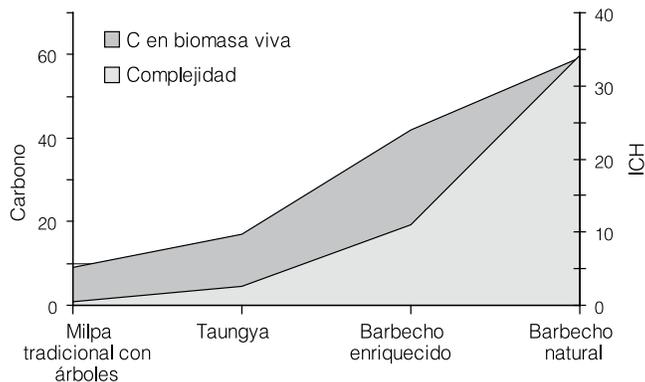


Figura 2. Relación entre el carbono contenido en la biomasa viva y el índice de complejidad de Holdridge (ICH) en cuatro sistemas agroforestales en Chilón, Chiapas, México.

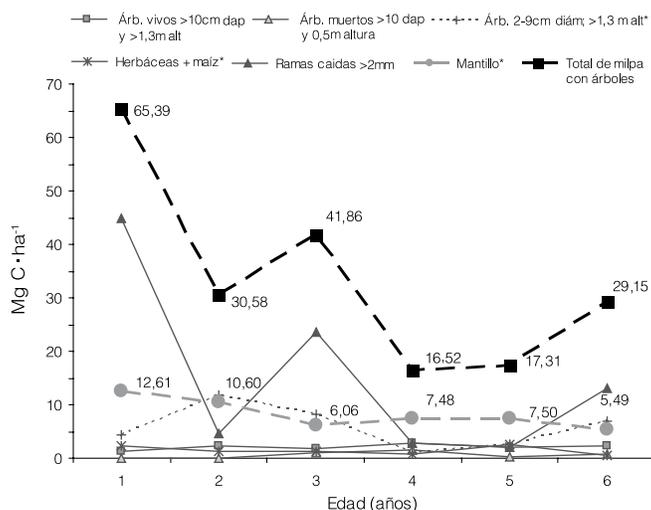


Figura 3. Relación entre el reservorio de carbono (Mg C·ha⁻¹) y la edad en los diferentes componentes del sistema de milpa tradicional en Chilón, Chiapas, México.

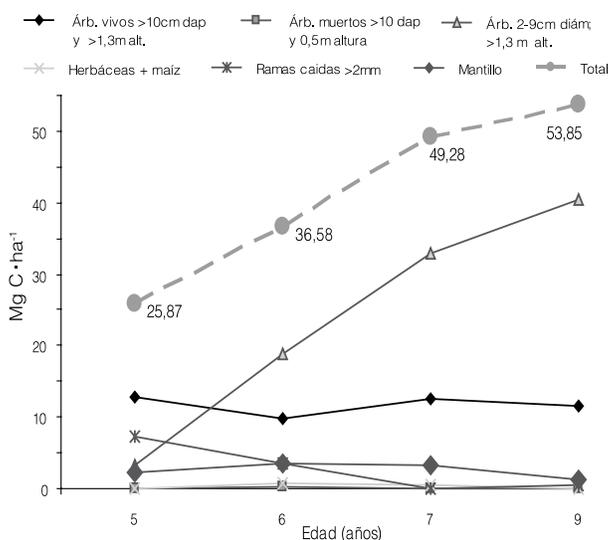


Figura 4. Relación entre el reservorio de carbono (Mg C·ha⁻¹) y la edad en los diferentes componentes del sistema taungya en Chilón, Chiapas, México.

medicinales y otros productos para autoabasto.

Relaciones entre las variables independientes y los reservorios de C

Se encontró una relación positiva (Figura 2) entre el ICH y los reservorios de C en la biomasa viva y la materia orgánica muerta (MOM). El barbecho natural tuvo los mayores reservorios de C, seguido por el barbecho mejorado, el sistema taungya y la milpa tradicional. En los cuatro sistemas el IU del suelo redujo los stocks de C, tanto de la biomasa viva como de la MOM ($R^2 = -0,43$; $p < 0,05$).

La milpa, no obstante que contiene un promedio de 210 árboles por ha, tuvo los menores contenidos de C en la biomasa y el C en este sistema disminuyó con el tiempo de uso (Figura 3). Los sistemas taungya y barbecho natural mostraron una relación positiva entre el C de la biomasa viva y la edad (Figura 4), tal como se esperaba; mientras que el barbecho enriquecido no mostró la misma tendencia. Los reservorios de C para los cuatro sistemas se presentan en la Tabla II.

La materia orgánica del suelo (MOS) fue el mayor reservorio en todos los sistemas, incluyendo la milpa, con un promedio de $103,4 \pm 15,0 \text{ mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ para los cuatro sistemas; equivalente al 73,2% de C_{tot} .

Adicionalmente, en todos los sistemas se encontró una disminución de C a mayor profundidad del suelo ($R^2 = 0,97$; $p < 0,05$). El sistema barbecho natural tuvo una relación positiva entre el C_{tot} y la edad, mientras que los otros sistemas no mostraron relación ($p > 0,05$).

Discusión

Hay claras diferencias en la acumulación de biomasa de acuerdo al SAF. Los sistemas taungya y acahual enriquecido representaron un incremento en biomasa, complejidad y C similar al sistema tradi-

cional de barbecho natural. Mientras que la milpa presentó una relación negativa entre la acumulación de C y el tiempo de establecimiento, en los sistemas taungya y el barbecho, el C acumulado en la biomasa viva aumentó. La pérdida de C en la milpa puede deberse al uso de la r-t-q, que incrementa la fertilidad del suelo en los primeros años, pero decrece sucesivamente debido a la erosión y la lixiviación, principalmente de las formas de C soluble, debido al uso continuo. En la milpa, la MOS también decreció con la edad, mostrando una disminución del 25% en solo dos años (entre 5 y 7 años). Los resultados de este estudio muestran que a mayor IU del suelo disminuyen los reservorios de C en la MOS, como han descrito otros autores (Schroeder, 1991; Johnson, 1992; Brown, 2002; Ardö y Olsson, 2004; Esquivel, 2005; Mutuo *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2005; FAO, 2006). La historia del uso del suelo puede también tener efectos sobre la variabilidad en la MOS (Esquivel, 2005).

Sin embargo, los SAF parecen incrementar su biomasa y contenidos de C con la edad, por lo que pueden constituir una alternativa eficiente para el secuestro de C. Los barbechos naturales más viejos tuvieron mayor complejidad en el tiempo, y valores similares de densidad y área basal como fueron reportados para acahuales de 30 años en Costa Rica (Finegan y Delgado, 2000). El período estudiado para los barbechos enriquecidos fue corto, debido al tiempo de establecimiento de estos sistemas, por lo que no es posible determinar una tendencia clara, pero cabe presumir que los barbechos enriquecidos alcanzarán una complejidad similar a los barbechos naturales en su madurez. Adicionalmente, los sistemas de barbecho tuvieron similar riqueza de especies en las mismas edades, tal como fue documentado previamente en otros estudios (Cayuela *et al.*, 2006), con la ventaja de que

TABLA II
RESERVORIOS DE C_{tot} EN LOS CUATRO SISTEMAS AGROFORESTALES EVALUADOS
EN EL MUNICIPIO DE CHILÓN, CHIAPAS MÉXICO

Reservorios (Mg C·ha ⁻¹)	Milpa tradicional con árboles	Taungya	Acahual natural	Acahual enriquecido	Promedio
Edad promedio (años)	3,7 ±2,3	6,8 ±2,7	23,8 ±12,5	7,3 ±3,3	10,4 ±14,4
Biomasa viva	9,2 ±3,4	16,9 ±3,8	59,3 ±24,9	42,0 ±29,7	31,9 ±36,7
Árboles ≥10cm d.a.p	2,1 ±0,6	11,8 ±2,2	34,8 ±21,6	14,6 ±12,9	15,8 ±21,8
Árboles <10cm d.a.p	4,9 ±3,6	2,2 ±2,7	16,7 ±7,3	23,5 ±31,9	11,8 ±16,0
Hierbas	1,5 ±0,9	0,3 ±0,5	0,3 ±0,2	0,4 ±1,2	0,6 ±0,9
Raíces gruesas	0,4 ±0,1	2,1 ±0,4	6,3 ±3,8	2,5 ±1,9	2,9 ±4,0
Raíces finas ≤5mm	0,3 ±0,2	0,5 ±0,3	1,3 ±0,6	0,9 ±0,6	0,8 ±0,7
Materia orgánica muerta	9,7 ±2,5	2,9 ±1,8	8,5 ±4,3	2,9 ±1,3	6,0 ±5,7
Árboles ≥10 d.a.p	0,6 ±0,6	0,04 ±0,1	1,7 ±2,4	0,2 ±1,1	0,6 ±1,2
Ramas caídas ≥3mm	0,8 ±0,5	0,4 ±0,5	1,6 ±1,1	0,6 ±1,2	0,8 ±0,8
Mantillo	8,3 ±2,9	2,6 ±1,6	5,3 ±3,4	2,1 ±1,0	4,5 ±4,6
Materia orgánica del suelo	108,9 ±24,5	89,5 ±38,0	109,8 ±27,2	105,2 ±41,0	103,4 ±15,0
0-10cm profundidad	51,2 ±8,7	44,5 ±15,7	51,7 ±10,9	48,7 ±19,7	49,0 ±5,3
10-20cm profundidad	31,8 ±10,7	27,8 ±15,7	33,5 ±9,9	34,7 ±13,2	31,9 ±4,8
20-30cm profundidad	25,9 ±9,6	17,3 ± 9,2	24,7 ±9,3	21,8 ±9,9	22,4 ±6,1
Carbono total del sistema	127,9 ±23,1	109,4 ±36,8	177,6 ±47,8	150,1 ±43,3	141,3 ±46,8

Media ± Intervalo de confianza 95%.

los barbechos enriquecidos podrían tener un mayor valor económico por la introducción de especies maderables.

Valorando las ventajas y las desventajas de los SAF, la milpa tradicional es importante por su valor cultural (Levy *et al.*, 2002), abastece a la familia campesina de alimentos y de otros productos, incluyendo los forestales. Sin embargo, los contenidos de C disminuyen con el uso continuo. Se esperaría que con un uso de este tipo, sin barbecho, los niveles de C pudieran disminuir significativamente. El sistema taungya solo permite cultivar la milpa en los primeros cinco años de la plantación, mientras que el barbecho natural provee diversas especies con valor de uso y cumple funciones ecológicas (Diemont *et al.*, 2006). Sin embargo, estos sistemas solo pueden ser recomendados para productores que usan actualmente sistemas rotacionales (Nair, 1993), donde hay poca presión por el uso del suelo y donde los productores tienen garantizado el autoabasto de granos. El barbecho natural puede tener valor económico si se convierte a un barbecho enriquecido mediante la plantación de especies con valor comercial. Aunque la mayoría de los agricultores de esta región han establecido SAF, motivados por el pago de la

captura de carbono en el corto plazo (Wise y Cacho, 2005), sus motivaciones se han reorientado hacia la madera, la cual podrán aprovechar en el mediano plazo (Ruiz, 2006).

Conclusiones

La complejidad de los sistemas taungya, barbecho natural y barbecho enriquecido incrementa el C en los reservorios de biomasa viva y materia orgánica muerta; mientras que el C en la materia orgánica muerta de la milpa tradicional disminuye con la edad. En los sistemas taungya y barbecho natural se encontraron tendencias positivas entre la acumulación de C en la biomasa viva y el tiempo de establecimiento. Se esperaría que el barbecho enriquecido en su madurez igualara al barbecho natural por cuanto a su acumulación de C. Los sistemas intervenidos acumularon mayores volúmenes promedio de C_{tot} que los sistemas tradicionales de similares edades. El mayor reservorio de C en los SAF fue la materia orgánica suelo con más del 70% de C, mientras la biomasa viva y la materia orgánica muerta aportaron casi un tercio del C_{tot}.

Con base en los resultados se sugiere que los sistemas taungya y barbecho enriquecido son una buena opción para mitigar gases efecto de

invernadero, evitar emisiones que podrían generarse por la quema, además de abastecer de madera a los pobladores locales. Es necesario evaluar otros servicios ambientales como la conservación de la diversidad asociada, la conservación de los ciclos de la materia orgánica, de los nutrientes del suelo y los beneficios socioeconómicos de estos sistemas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Carlos Mario Aguirre, Nelson Rendón y Manuel Anzueto Martínez por su apoyo en el trabajo de campo, a Manuel Gutiérrez, Juan Morales y Miguel López por su ayuda en el procesamiento de las muestras de laboratorio, a los productores de las parcelas evaluadas y a la ONG AMBIO por permitir trabajar en sus parcelas establecidas, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a la Secretaría de Educación Pública (CONACYT-SEP-2004-CO1-46244), a la Fundación FORD y al Postgrado de El Colegio de la Frontera Sur por el apoyo económico para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

Acosta M (2003) *Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono*

en sistemas con vegetación forestal agrícola de ladera de México. Tesis. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 121 pp.

- Albrecht A, Kandji ST (2003) Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Env.* 99: 15-27.
- Alegre J, Cassel K (1996) Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agric. Ecosyst. Env.* 58: 39-48.
- Anderson JM, Ingram JSI (1993) *Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods*. CAB. Wallingford, RU.
- Ardó J, Olsson L (2004) Soil carbon sequestration in traditional farming in Sudanese dry lands. *Env. Manag.* 33: 318-329.
- Brown JK, Roussopoulos PJ (1974) Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *For. Sci.* 20: 350-356.
- Brown S (1996) Present and potential roles of forests in the global climate change debate. *Unasylva* 185: 3-10.
- Brown S (1997) *Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer*. Forestry Paper N° 134. FAO. Roma, Italia, 55 pp.
- Brown S (2002) Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Env. Pollut.* 116: 363-372.
- Cairns MA, Brown S, Helmer EH, Baumgardner EH (1997) Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecologia* 111: 1-11.
- Callo-Concha DA (2001) *Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la Amazonia del Perú*. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo. México. 72 pp.
- Castellanos J, Maass M, Kummerow J (1991) Root biomass of a dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant Soil* 131: 225-228.
- Cayuela L, Duncan JG, Rey-Benayas JM, González-Espinoza M, Ramírez-Marcial N (2006) Fragmentation, disturbance and tree diversity conservation in tropical montane forests. *J. Appl. Ecol.* 43: 1172-1181.
- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA (2005) Tree allometric and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87-99.
- Diemont SAW, Martin JF, Levy-Tacher SI (2006) Energy evaluation of Lacandon Maya indigenous swidden agroforestry

- in Chiapas, Mexico. *Agrofor. Syst.* 66: 23-42.
- Esquivel E (2005) *Uso de suelo y almacenamiento de carbono en dos comunidades del municipio de Marqués de Comillas, Chiapas*. Tesis. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 136 pp.
- FAO (1995) *Planning for Sustainable Use of Land Resources*. FAO Land and Water Bulletin N° 2. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 67 pp.
- FAO (2006) *La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios*. UN Food and Agriculture Organization www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s06.htm (15/06/2006).
- Finegan B, Delgado D (2000) Structural and floristic heterogeneity in a 30 year-old Costa Rican rain forest restored on pasture through natural secondary succession. *Restor. Ecol.* 8: 380-393.
- Frangi JL, Lugo AE (1985) Ecosystem dynamics of subtropical floodplain forest. *Ecol. Monogr.* 55: 351-369.
- García E (1973) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 2ª ed. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 217 pp.
- ICRAF (2001) *Methods for sampling carbon stocks above and below ground*. ICRAF. Bogor, Indonesia. 26 pp.
- INEGI (1984) *Carta de uso del suelo y vegetación 1:25000*. Mapas E 15. 8, E 15-11. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (2000) *Chiapas XII. Censo General de Población y Vivienda 2000*. Integración Territorial. Tomo 1 y 2. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Chiapas-México.
- IPCC (2001) Climate change 2001: the scientific basis. En Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X., Mashell K, Johnson CA (Eds.) *Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 881 pp.
- IPCC (2003) *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Editores: Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti, Buendía R, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japón. www.ipcc-nggip.iges.or.jp.
- Johnson DW (1992) Effects of forest management on soil carbon storage. *Water Air Soil Pollut.* 64: 83-120.
- Jong BHde, Montoya-Gómez G, Nelson K, Soto-Pinto L, Taylor J, Tipper R (1995) Community forest management and carbon sequestration: a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20: 409-416.
- Kalacska M, Sanchez-Azofeifa GA, Calvo-Alvarado JC, Quesada M, Rivard B, Janzen DH (2004) Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *For. Ecol. Manag.* 200: 227-247.
- Kotto-Same J, Woome PL, Appolinaire M, Louis Z (1997) Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agric. Ecosyst. Env.* 65: 245-256.
- Levy SI, Aguirre JR, Martínez MM, Durán A (2002) Caracterización del uso tradicional de la flora espontánea en la comunidad lacandona de Lacanhá, Chiapas, México. *Interciencia* 27: 512-520.
- Litynski JT, Scott MK, McIlvried, Rameshwar DS (2006) An overview of terrestrial sequestration of carbon dioxide: The United States Department of Energy's fossil energy R&D program. *Climatic Change* 74: 81-95.
- MacDicken KG (1997) *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development. Arlington, VA, EEUU. 87 pp.
- Márquez L (2000) *Elementos Técnicos para Inventarios de Carbono en Uso de Suelo*. Fundación Solar. Guatemala. 36 pp.
- Montoya G, Soto-Pinto L, Jong Bde, Nelson K, Farías P, Taylor J, Tipper R (1995) *Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas*. Instituto Nacional de Ecología. México. 79 pp.
- Müller-Dombois D, Ellenberg H (1974) *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. Wiley. Nueva York, EEUU. 547 pp.
- Mutuo PK, Cadisch G, Albrecht A, Palm C, Verchot L (2005) Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 71: 43-54.
- Nair K (1993) *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer. Dordrecht, Holanda. 499 pp.
- Oelbermann M, Voroney P, Gordon AM (2004) Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and Southern Canada. *Agric. Ecosyst. Env.* 104: 359-377.
- Peichl M, Thevathasan NV, Gordon A, Huss J, Abohassan RA (2006) Carbon sequestration potentials in temperature tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 66: 243-257.
- Ruiz OPC (2006) *Sistemas agroforestales para la captura de carbono en Chiapas, México: ¿De la adopción a la apropiación?*. Tesis. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal, de las Casas, México. 81 pp.
- Schroeder P (1991) Can intensive management increase carbon storage in forests?. *Environ. Manag.* 15: 475-481.
- Scott NA, Rodrigues H, Hugues J, Lee T, Davidson EA, Dail DB, Malerba P, Hollinger DY (2004) Changes in carbon storage and net carbon exchange one year after an initial shelterwood harvest at Howland Forest. *Env. Manag.* 33: 9-22.
- Soto-Pinto L, Jiménez-Ferrer G, Vargas-Guillén A, De Jong-Bergsma B, Esquivel-Bazan E (2004) Experiencia agroforestal para la captura de carbono en comunidades indígenas de México. *Rev. For. Iberoamer.* 1: 44-50.
- Tian G, Kang BT, Kolawole GO, Idinoba P, Salako FK (2005) Long-term effects of fallow systems and lengths on crop production and soil fertility maintenance in West Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 71: 139-150.
- Vogt KA, Vogt DF, Palmiotto PA, Boon P, O'Hara J, Asbjørnsen H (1996) Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant Soil* 187: 159-219.
- Winjum JK, Dixon RK, Schroeder PE (1992) Estimating the global carbon forest and agroforestry management practice to sequester carbon. *Water, Air Soil Pollut.* 64: 213-227.
- Wise R, Cacho O (2005) A bioeconomic analysis of carbon sequestration in farm forestry: a simulation study of *Gliricidia sepium*. *Agrofor. Syst.* 64: 237-250.
- Young A (1994) *Agroforestry for Soil Conservation*. BPC Wheats, Exeter, RU. 276 pp.