

NOTA TÉCNICA

FIJACIÓN DE CARBONO Y PORCENTAJE DE SOMBRA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN EL LÍBANO, TOLIMA, COLOMBIA

Hernán J. Andrade¹, Lina M. Marín¹ y Diana P. Pachón¹

RESUMEN

Los cafetales arbolados representan una de las estrategias para capturar carbono y, en consecuencia, ayudan a mitigar el cambio climático global. En este trabajo se estudió la tasa de fijación y almacenamiento de carbono, en los siguientes sistemas de producción de café en el Líbano, Tolima, Colombia: 1) monocultivo; 2) sistemas agroforestales (SAF) con plátano (*Musa AAB*); 3) SAF con nogal cafetero (*Cordia alliodora*) y 4) SAF con caucho (*Hevea brasiliensis*). Se establecieron parcelas de muestreo para medir los diámetros del tallo en cafetos y árboles, y la altura de la planta en los cafetos. Se estimó la biomasa aérea de las plantas con base en modelos de biomasa disponibles para estas especies. Se encontró que la tasa media de fijación de carbono del SAF con nogal ($4,37 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) superó ($P\leq 0,05$) al resto de los sistemas de producción de café, y dentro de éstos, los árboles del dosel de sombra representaron el componente de almacenamiento de carbono más importante ($3,57$ y $1,20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para el nogal y caucho, respectivamente). Para el momento del estudio el SAF con nogal habría logrado un almacenamiento de carbono de $36,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 8,4 años, el SAF con caucho $22,9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 14,6 años, el SAF con plátano $1,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2,1 años y el cafeto en monocultivo $2,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 3,5 años. La máxima fijación de carbono se encontró para los SAF que proyectaban un nivel de sombra del 33 %. Se demostró el potencial de estos sistemas de producción para ser incluidos en proyectos de sumidero de carbono.

Palabras clave adicionales: Biomasa aérea, cambio climático, *Cordia alliodora*, *Hevea brasiliensis*, plátano

ABSTRACT

Carbon fixation and shade percentage in coffee (*Coffea arabica* L.) production systems in Líbano, Tolima, Colombia

Coffee plantation with trees represents an important system for carbon sequestration and a strategy to mitigate global climate change. In this research it was studied the fixation rate and storage of carbon in the following coffee production systems in Líbano, Tolima, Colombia: 1) monoculture plantation; 2) agroforestry systems (AFS) with plantain (*Musa AAB*); 3) AFS with salmwood (*Cordia alliodora*); and 4) AFS with rubber trees (*Hevea brasiliensis*). Sample plots were established to measure stem diameter and height on coffee plants, along with stem diameter of trees. Total aboveground biomass of plants was estimated using available biomass models for those species. It was found that the average rate of carbon fixation in AFS with salmwood ($4.37 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) was higher ($P\leq 0.05$) than the rest of the coffee production systems, and the trees showed to be the system component that accounted for most carbon storage (3.57 and $1.20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ for salmwood and rubber trees, respectively). By the time of the study, the AFS with salmwood had achieved a carbon storage of $36.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 8.4 years, the AFS with rubber tree $22.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 14.6 years, the AFS with banana $1.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 2.1 years, and the coffee monoculture $2.2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 3.5 years. The greatest carbon fixation was found with a shade of 33 %, showing the potential of these production systems to be included in carbon sequestration projects.

Additional key words: Aboveground biomass, climate change *Cordia alliodora*, *Hevea brasiliensis*, plantain-tree

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha sido atribuido principalmente a causas antropogénicas, tal como

la deforestación, degradación de suelos y al uso de combustibles que emiten gases de efecto invernadero, como el CO_2 (IPCC, 2001). Se predice que el cambio climático afectará a los

Recibido: Agosto 9, 2013

Aceptado: Abril 1, 2014

¹ Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (PROECUT), Universidad del Tolima. Ibagué. Colombia e-mail: hjandrade@ut.edu.co

países en desarrollo más gravemente a causa de su baja capacidad de adaptación. La Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) ha propuesto la adaptación y mitigación como estrategias para luchar contra este problema medioambiental. Ello consiste en reducir las fuentes y/o aumentar los sumideros de carbono, tal como el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), el cual incluye al uso del suelo y la forestería, como es el caso de las plantaciones de leñosas perennes y los sistemas agroforestales (IPCC, 2001). Los SAF que incluyen la producción de café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra, son utilizados en países como Costa Rica, Puerto Rico y Colombia (Andrade et al., 2008; Avilés, 2009), y son una estrategia para estos proyectos, ya que fijan carbono en la biomasa y suelo (Albrecht y Kandji, 2003; Montagnini y Nair, 2004; Soto-Pinto et al., 2010).

Los sistemas de producción de café tienen relevancia económica mundial, ya que reúnen a cerca de 25 millones de productores (Giovannucci y Koekoek, 2003). En Colombia, la producción de café se caracteriza por incorporar un gran número de pequeños productores, y tiene una alta relevancia social, ya que es la actividad que genera mayor empleo. En el 2013, el Tolima fue el segundo productor nacional de café, luego de Huila y Antioquia, con el 12 % del área cultivada nacional (FNC, 2014). La producción de café en el país se realiza bajo diferentes sistemas de manejo, tal como el monocultivo y en SAF con diferente estructura y composición del dosel de sombra.

El objetivo de este estudio fue estimar el potencial de fijación y almacenamiento de carbono atmosférico en la biomasa aérea de los sistemas de producción de café más predominantes del municipio del Líbano, Tolima, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionó el municipio del Líbano, Tolima, Colombia (4° 55' N; 75° 04' W), por tener una alta vocación cafetera y reunir un variado grupo de sistemas de producción de café. Este municipio presenta una altitud promedio de 1565 msnm, una precipitación media de 2235 mm anuales y un clima templado húmedo con una temperatura media de 19,1 °C, variando entre 13,5 y 25,0 °C (CORTOLIMA, 1997).

Se seleccionaron cuatro fincas por cada uno de los siguientes sistemas de producción: 1) cafetos en monocultivo; 2) sistemas agroforestales (SAF) con plátano (*Musa AAB*); 3) SAF con nogal cafetero (*Cordia alliodora*); y 4) una de SAF con caucho (*Hevea brasiliensis*). Estos sistemas son los más predominantes en la zona.

El almacenamiento de carbono se estimó mediante un muestreo no destructivo en las fincas, realizando un inventario de los individuos de especies leñosas perennes del sistema (cafetos y el dosel de sombra). Para ello, se establecieron dos parcelas de muestreo rectangulares de 600 m² cada una con diez árboles de caucho y de cuatro a diez árboles de nogal. Posteriormente, se midió el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap) y la altura total en todos los árboles del dosel de sombra cuyo dap fuese mayor a 10 cm. En un extremo de cada parcela se estableció una subparcela para medir el diámetro del tallo a 15 cm de altura y la altura total de todas las plantas de café. Se calculó la biomasa aérea total producida por cada una de las especies participantes mediante el empleo de los siguientes modelos matemáticos:

$$\text{Log}(B) = -1,1 - 1,6 \cdot \text{Log}(D_{15}) + 0,6 \cdot \text{Log}(h)$$

(Segura et al., 2006; para cafetos)

B: Biomasa aérea (kg por planta)

D₁₅: Diámetro del tronco a 15 cm de altura (cm)

h: Altura total (m)

$$B = 0,36 \cdot \text{dap}^{2,089}$$

(Monroy y Návar, 2004; para *H. brasiliensis*)

dap: Diámetro del tronco a la altura del pecho (cm)

La biomasa aérea de *C. alliodora* fue estimada con base en un modelo desarrollado en sistemas agroforestales con cacao en Talamanca, Costa Rica, con árboles de entre 3,9 y 102 cm de dap y 5,4 a 46,3 m de altura total (H. Andrade et al. Datos no publicados). El modelo estuvo representado por la siguiente ecuación ($R^2 = 0,92$; $P \leq 0,001$):

$$B = 10^{(-0,51 + 2,08 \cdot \text{Log}(\text{dap}))}$$

En todos los casos, la biomasa se transformó a carbono empleando la fracción de carbono promedio de 0,5 sugerida por defecto por el IPCC (2001). La tasa media de fijación de carbono se estimó como el cociente entre el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea entre la edad del sistema por componente (cafetos y árboles de

sombra). En caso de tener componentes de diferente edad, se realizó la estimación por individuo o por especie.

En cada unidad de muestreo se estimó la sombra mediante el uso de fotografías digitales que definieron la fracción del área del suelo cuya radiación era interceptada por el dosel de los árboles (Bellow y Nair, 2003). Se tomaron cinco fotografías digitales verticalmente hacia el dosel de sombra, distribuidas en toda la unidad de muestreo, evitando que los rayos solares toquen el lente de la cámara. Las fotografías se tomaron aproximadamente a la hora local de 8:00 y 17:00 (declinación solar de 17°07'32" y 5°32'43", respectivamente), y las imágenes se analizaron con el programa Gap Light Analyzer.

Se comparó la tasa de fijación de carbono entre los diferentes sistemas de producción de café mediante análisis de varianza y prueba de medias de Tukey utilizando el programa estadístico Infostat. Asimismo, se realizó un análisis de correlación y de regresión para definir la asociación entre los niveles de sombra y el almacenamiento del carbono.

RESULTADOS

Se encontró que la tasa media de fijación de carbono del SAF con nogal (4,37 Mg·ha⁻¹·año⁻¹) superó estadísticamente (P≤0,05) al resto de los sistemas de producción de café (Cuadro 1), y dentro de éstos, los árboles del dosel de sombra representaron el componente de almacenamiento de carbono más importante (3,57 y 1,20 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ para el nogal y caucho, respectivamente). Asimismo, al totalizar la tasa de fijación anual de los SAF con las dos especies arbóreas (*C. alliodora* y *H. brasiliensis*) se obtuvo un valor mucho mayor que el de aquellos sistemas sin árboles (2,97 vs. 0,63 Mg·ha⁻¹·año⁻¹). Dada la baja o nula permanencia del carbono almacenado en las plantas de plátano, por la ausencia de estructuras leñosas, se consideró que su fijación de carbono era cero; de esta manera, al comparar la fijación en los árboles con relación a la de los cafetos, se puede determinar que los árboles contribuyen con aproximadamente el 66 % de la fijación de carbono en estos sistemas de producción de café.

Con relación a las plantas de cafeto, el promedio mayor en la tasa de fijación de carbono

se encontró en los cafetos del SAF con nogal (0,80 Mg·ha⁻¹·año⁻¹), pero sin diferencias estadísticas con los demás tratamientos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Fijación media de carbono (Mg·ha⁻¹·año⁻¹) en cafetos y árboles del dosel de sombra en sistemas de producción de café

Sistemas	Cafetos	Árboles	Total
Monocultivo	0,63 a	-	0,63 b
SAF con nogal	0,80 a	3,57 a	4,37 a
SAF con plátano	0,63 a	0	0,63 b
SAF con caucho	0,37 a	1,20 b	1,57 b

En cada columna, letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (P≤0,05).

Para el momento del estudio, y en función de la edad de los árboles, se estimó que el SAF con nogal habría logrado un almacenamiento de carbono en la biomasa aérea 36,7 Mg·ha⁻¹ en 8,4 años, el SAF con caucho 22,9 Mg·ha⁻¹ en 14,6 años, el SAF con plátano 1,3 Mg·ha⁻¹ en 2,1 años y el cafeto en monocultivo 2,2 Mg·ha⁻¹ en 3,5 años. Esto significa que, para ese momento, los SAF con café almacenaban más de 96 % del carbono total arriba del suelo.

La estimación del nivel de sombra al cafeto en las unidades de muestreo indica que se generó significativamente mayor sombaje (P≤0,05) por los árboles de *H. brasiliensis* (53,8 ± 5,0 %) que por los de *C. alliodora* (40,2 ± 4,6 %), y se encontró una correlación positiva (r = 0,65; P≤0,01) entre el nivel de sombra y la tasa anual de fijación de carbono (Cuadro 2). La correlación fue ligeramente inferior cuando se consideró el almacenamiento acumulado durante la vida del árbol (r = 0,65; P≤0,01). Por su parte, no se detectó asociación entre el nivel de sombra producida por los árboles y la fijación de carbono en los cafetos.

Se encontró un modelo predictivo de tendencia cuadrática que estima la tasa de fijación de carbono en función del nivel de sombra, el cual señala que la mayor fijación ocurre en los cafetales evaluados cuando existe alrededor de 33 % de sombra (Figura 1), destacándose que niveles de sombra altos (superiores al 60 %) o muy bajos (cerca de cero) se corresponderían con una fijación de carbono menor a 1 Mg·ha⁻¹·año⁻¹.

De acuerdo a los resultados, los árboles de *C. alliodora* tienen un mayor potencial, que los de *H. brasiliensis*, para ser asociados al cafeto para

mitigar gases de efecto invernadero, ya que presentan una mayor tasa de fijación de carbono a la vez que generan una sombra significativamente menor, lo cual, potencialmente, tendría un efecto menor sobre la productividad de los cafetos.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación (r) y probabilidad estadística (P) para la tasa anual de fijación de carbono y el almacenamiento acumulado con respecto a la sombra producida por el dosel en sistemas de producción de café

		r	P
		Tasa de fijación (Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Árboles
	Cafetos	-0,14	0,49 ns
	Total	0,65	0,01
Almacenamiento (Mg·ha ⁻¹)	Árboles	0,65	0,01
	Cafetos	-0,04	0,85 ns
	Total	0,65	0,01

ns: no significativo

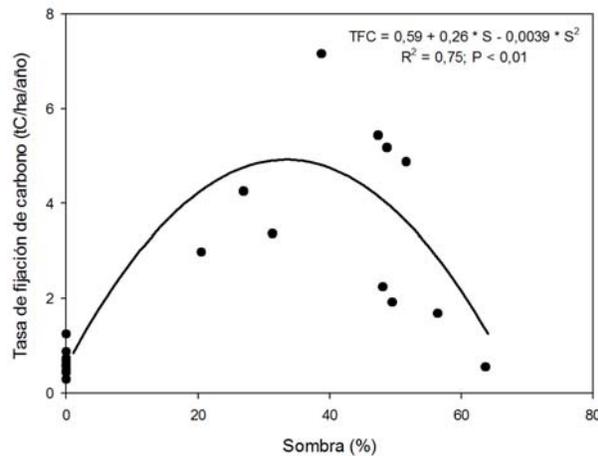


Figura 1. Impacto de la sombra en la tasa de fijación de carbono en biomasa aérea en sistemas de producción de café en el Líbano, Tolima, Colombia. TFC: tasa de fijación de carbono (Mg·ha⁻¹·año⁻¹); S: sombra (%)

DISCUSIÓN

La mayor tasa de fijación de carbono se produjo en los sistemas que incluyeron árboles, los cuales pueden retener el carbono en su madera por un tiempo prolongado. Las tasas de fijación en los sistemas de producción de este estudio son congruentes con otras investigaciones similares en café y cacao; por ejemplo, guardan similitud con los valores de 2,1 y 4,5 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ reportados

en Costa Rica por Ávila et al. (2001) para SAF con *Eucalyptus deglupta* y *Erythrina poeppigiana*, respectivamente, y con el valor de 2,7 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ señalado por Segura y Andrade (2012) para diversos SAF. También en Costa Rica, Oelbermann et al. (2004) y Avilés (2009) demostraron que los cafetales en SAF fijan más carbono que aquellos en monocultivo, y Hergoualc'h et al. (2012) encontraron tasas de fijación de carbono en biomasa de más del doble en SAF de cafetos con *Inga densiflora* que en cafetales en monocultivo (4,6 vs. 2,0 Mg·ha⁻¹·año⁻¹). En Colombia se ha reportado una tasa de fijación de 4,3 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ en SAF con cacao y *C. alliodora* (Aristizábal y Guerra. Universidad Distrital, Bogotá. Datos no publicados), aunque Gutiérrez et al. (2006), trabajando en SAF con esta misma especie arbórea, de 25 años de edad, hallaron que la tasa de fijación de carbono alcanzó valores notoriamente mayores (8,4 Mg·ha⁻¹·año⁻¹). Estos datos demuestran el beneficio ambiental de los SAF, en términos de almacenamiento del carbono, y por ende, mitigación del cambio climático (Montagnini y Nair, 2004).

Con relación a los niveles de sombra generados por *C. alliodora*, se encontró que los resultados son similares a los reportados por Bellow y Nair (2003), con árboles de 3 a 9 años en Costa Rica. De acuerdo a la literatura, los niveles de sombra encontrados en estos SAF no afectan la producción de los cafetos; al respecto, Righi et al. (2007) hallaron que los cafetos toleran una reducción en la disponibilidad de radiación solar del 50 % sin una caída en el crecimiento e índice de área foliar, mientras que Staver et al. (2001) concluyeron que la producción es maximizada con coberturas de sombra de 35 a 65 %. Por su parte, Farfán (2007) señaló las ventajas de tener cafetales con sombrero a esas intensidades en Colombia.

Estos resultados permiten comprobar que los SAF con cafetos, de alta productividad, pueden ser incluidos en proyectos tales como el MDL propuesto por la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático. De esta forma, eventualmente los productores cafeteros podrían recibir ingresos adicionales, por incrementos de la productividad, otros productos y pagos por servicios ambientales, y así mejorar su calidad de vida. Colombia, junto con Brasil y Argentina, son

los países de América Latina más interesantes para este tipo de proyectos de aforestación y reforestación, principalmente los dos primeros países, debido a sus altas tasas de almacenamiento de carbono y los bajos costos asociados a este proceso (Benítez y Obersteiner, 2006).

CONCLUSIONES

Los sistemas agroforestales con nogal y caucho presentaron la mayor tasa de fijación de carbono en la biomasa aérea (4,37 y 1,57 Mg·ha⁻¹·año⁻¹) en contraste con aquellos sistemas en monocultivo o con sombra de plátano (0,6 Mg·ha⁻¹·año⁻¹).

En los sistemas agroforestales de cafetos con sombra de árboles se incrementó la tasa de fijación de carbono al aumentar la sombra, hasta un máximo de 33 %, valor a partir del cual comenzó a declinar.

Los sistemas de producción de café, principalmente aquellos con árboles de sombra, podrían ser incluidos en proyectos de pago por servicios ambientales, tal como los MDL, de forma que los productores cafeteros podrían recibir ingresos adicionales, a la vez que participarían en la importante tarea de ayudar a mitigar el cambio climático.

AGRADECIMIENTO

A los productores de café del Líbano, Tolima, que participaron en el estudio ofreciendo sus cafetales para los muestreos y apoyaron con su tiempo. Al Comité Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por el apoyo financiero (proyectos códigos 80111 y 260210).

LITERATURA CITADA

- Albrecht, A. y S.T. Kandji. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99: 15-27.
- Andrade, H.J., M. Segura, E. Somarriba y M. Villalobos. 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 46: 45-50.
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35.
- Avilés, I. 2009. Fijación biológica de nitrógeno y almacenamiento de carbono en agrosistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en Puerto Rico. Tesis. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez. 124 p.
- Bellow, J.G. y P.K. Nair. 2003. Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology* 114: 197-211.
- Benítez, P. y M. Obersteiner. 2006. Site identification for carbon sequestration in Latin America: A grid-based economic approach. *Forest Policy and Economics* 8: 636-651.
- CORTOLIMA (Corporación Autónoma Regional del Tolima). 2007. Caracterización ambiental del Municipio del Líbano. Ibagué, Tolima, Colombia. 216 p.
- FNC (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia). 2014. Información estadística cafetera. <http://www.federaciondecafeteros.org> (consulta del 20/12/2013).
- Farfán, F. 2007. Producción de café en sistemas agroforestales. *In: Arcila, Farfán, Moreno, Salazar e Hincapié (eds.). Sistemas de Producción de Café en Colombia. Cenicafé. Chinchiná, Colombia. pp. 161-200.*
- Giovannucci, D. y F.J. Koekoek. 2003. The State of Sustainable Coffee: A Study of Twelve Major Markets. Edit. Feriva. Cali. Colombia. 199 p.
- Gutiérrez, V., M. Zapata, C. Sierra, W. Laguado y A. Santacruz. 2006. Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model. *Forest Ecology and Management* 226: 341-350.
- Hergoualc'h, K.E. Blanchart, U. Skiba, C. Henault y J.M. Harmand. 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 102-110.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change Synthesis*

- Report: A Summary for Policymakers. IPCC. Wembley, UK.
14. Monroy, C. y J. Návar. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10: 29-43.
15. Montagnini, F. y P. Nair. 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61-62(1-3): 281-295.
16. Oelbermann, M., R. Voroney y A. Gordon. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and Southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 359-377.
17. Righi, C., M. Bernardes, A. Lunz, C. Pereira, D. Neto y J. Favarin. 2007. Measurement and simulation of solar radiation availability in relation to the growth of coffee plants in an agroforestry system with rubber trees. *Árvore* 31(2): 195-207.
18. Segura, M. y H. Andrade. 2012. Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Revista Luna Azul* 35: 60-77.
19. Segura, M., M. Kanninen y D. Suárez. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* 68: 143-150.
20. Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jiménez Ferrer y B. De Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 78: 39-51.
21. Staver, C., F. Guharay, D. Monterroso y R.G. Muschler. 2001. Designing pest suppressive multistrata perennial crop systems: shade grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems* 53: 151-170.