

ISSN 1022-7482

AGROFORESTERÍA

EN LAS AMÉRICAS

N°41-42 2004

www.catie.ac.cr/revistas/



Investigación Agroforestal de Posgrado en el CATIE

CATIE
Centro Agronómico Tropical
de Investigación y Enseñanza

Editorial

La investigación agroforestal de posgrado en el CATIE

Glenn Galloway 4

Avances de investigación

Interacciones competitivas entre *Coffea arabica* y árboles maderables de rápido crecimiento en Pérez Zeledón, Costa Rica

Rudi van Kanten; John Beer; Götz Schroth; Philippe Vaast 5

Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica de fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua

Alfredo Ruiz; Muhammad Ibrahim; Bruno Locatelli; Hernán Andrade; John Beer 16

Pérdida y liberación de nutrimentos durante la descomposición de tres tipos de compost en condiciones de campo

Claudia Yaniris Muñoz Astaíza; Reinhold Muschler; Tamara Benjamin; Jean-Michel Harmand; Gabriela Soto 22

Relaciones entre la cobertura arbórea en potreros y la producción bovina en fincas ganaderas en el trópico seco en Cañas, Costa Rica

Claudia Restrepo-Sáenz; Muhammad Ibrahim; Celia Harvey; Jean Michel Harmand; Jorge Morales 29

Diversidad de escarabajos estiercoleros en el bosque y en cacaotales con diferente estructura y composición florística en Talamanca, Costa Rica

Pedro Suatunze; Eduardo Somarriba; Celia Harvey; Bryan Finegan 37

Caracterización de los sistemas silvopastoriles tradicionales del distrito de Bugaba, Provincia de Chiriquí, Panamá

Rodrigo Cerrud; Cristóbal Villanueva; Muhammad Ibrahim; Dietmar Stoian; Humberto Esquivel 43

Caracterización del sistema agroforestal maíz con árboles dispersos en la cuenca del río Carrizal, Manabí, Ecuador

Ricardo Limongi Andrade; Celia A. Harvey; Francisco Jiménez; Tamara Benjamin 50

Incidencia de la broca (*Hypothenemus hampei*) en plantas de café a pleno sol y bajo sombra de *Eugenia jambos* y *Gliricidia sepium* en San Marcos, Nicaragua

Domingo Feliz Matos; Falguni Guharay; John Beer 56

Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas y en mezclas

Rodolfo Munguía; John Beer; Jean-Michel Harmand; Jeremy Haggard 62

Disponibilidad de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de *Coffea arabica*

Martha Gutiérrez Castillo; Jean-Michel Harmand; Etienne Dambrine 69

Comportamiento vegetativo y productivo de *Coffea arabica* a pleno sol y en tres sistemas agroforestales en condiciones subóptimas en Costa Rica

Robert Angrand; Philippe Vaast; John Beer; Tamara Benjamin 77

Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica

Hector Ávila; Jean-Michel Harmand; Etienne Dambrine; Francisco Jiménez; John Beer; Robert Oliver 83

Artículos invitados

Cuantificación del carbono radicular de *Erythrina poeppigiana* de cuatro y diez años establecidos en callejones en Costa Rica

Maren Oelbermann; Paul Voroney; Andrea Schlönvoigt 92

Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica

Sergio de Miguel Magaña; Jean-Michel Harmand; Kristell Hergoualc'h 98

Tipologías cafetaleras de la Reserva Natural Miraflores - Moropotente, Estelí, Nicaragua

Cristhian Zúñiga; Eduardo Somarriba; Vera Sánchez 105

Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales de Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos

Damaris Suárez; Milena Segura; Markku Kanninen 112

¿Cómo hacerlo?

¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales?

Eduardo Somarriba 120

Reseñas agroforestales

..... 129

Publicaciones agroforestales del CATIE

..... 131

Agenda agroforestal

..... 140

Agroforestería en las Américas

Nº 41-42, 2004



AGROFORESTERÍA
EN LAS AMÉRICAS



Monitoreo de escarabajos realizado por finqueros indígenas de Talamanca, Costa Rica (foto: Archivo Proyecto Cacao y Biodiversidad CATIE-GEF-Banco Mundial). (p. 39)



Parcelas de escorrentía de 1 m² para medir pérdidas de N mineral por escorrentía superficial en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe de la Zona Sur de Costa Rica (foto: Héctor Ávila). (p. 84)



Separación de las diferentes partes de un café (hojas, fruto, bandolas y tallo) para calcular la biomasa, Finca verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica (foto: Sergio de Miguel Magaña). (p. 101)

Editorial

La investigación agroforestal de posgrado en el CATIE

Como Decano de la Escuela de Posgrado del CATIE, me complace introducir este número especial de nuestra revista *Agroforestería en las Américas*, conformado por artículos derivados de las tesis de grado de estudiantes de maestría de la promoción 2002. Personalmente, considero que la etapa más importante en el Programa de Maestría es la realización del proyecto de tesis por parte de los estudiantes y sus comités asesores. Una parte fundamental de esta etapa es la redacción de uno o más artículos para su publicación en revistas regionales e internacionales. Con este número, los estudiantes y sus comités han logrado culminar este proceso y ponen a la disposición de un público amplio los resultados de su investigación.

La planificación, ejecución, análisis e interpretación de los resultados de un proyecto de tesis representan toda una aventura de descubrimiento que genera una serie de nuevos conocimientos. En cooperación con diversos socios de los países de América Tropical, el CATIE implementa una cantidad considerable de iniciativas en el campo agroforestal que continuamente requieren información actualizada para aumentar su relevancia e impacto. Así, los resultados de la investigación aportan en forma directa al desarrollo agroforestal en la Región.

A menudo, se ha reflexionado sobre el enorme esfuerzo de investigación que representa el conjunto de tesis que se genera cada año en el CATIE. En cada uno de los trabajos presentados han participado entre tres y seis investigadores. La etapa de planificación de los trabajos de tesis inicia durante el primer año de estudios de nuestros estudiantes de maestría y, en general, la defensa se realiza al final del segundo año, es decir, requiere un año y medio de esfuerzo sostenido. Por otro lado, cada proyecto de tesis exige el esfuerzo principal del estudiante más la colaboración de los miembros de su comité y, en muchos casos, una participación adicional de cooperantes en los países y de los productores. Así, cada año en el CATIE se acumula más de 100 años/persona de investigación en temas relacionados con la agricultura tropical, la agroforestería, los recursos naturales y el ambiente.

Otro aspecto importante que debemos considerar es el carácter internacional de la investigación que se realiza en el CATIE. En este número especial se incluyen investigaciones llevadas a cabo en cuatro países, con la participación de investigadores procedentes de alrededor de 20 países. Este ambiente internacional es enriquecedor desde las perspectivas científicas y culturales. Los estudiantes, además de fortalecer sus conocimientos en la planificación y ejecución de un trabajo de investigación, aprenden a trabajar en equipos multidisciplinarios y multiculturales. La realización de estos estudios abarca una amplia gama de enfoques disciplinarios, y ha exigido la aplicación de diversos métodos de investigación que pueden servir en el futuro para orientar nuevos trabajos ejecutados por ustedes, nuestros lectores.

Quisiera aprovechar esta oportunidad para expresar mi agradecimiento a todos los profesores que dedicaron su tiempo para orientar a los estudiantes en sus proyectos de investigación, a la comunidad de donantes que brinda el apoyo financiero a nuestros estudiantes y a los proyectos donde los estudiantes pueden efectuar sus investigaciones en un contexto real. Asimismo, quisiera reconocer la contribución de los profesionales e investigadores en los países que aportaron su tiempo y, en forma especial, a los productores que compartieron sus conocimientos, criterios y fincas para realizar una buena parte de estos estudios.

Espero que nuestros lectores gocen de los frutos de este gran esfuerzo, e invitamos a otros investigadores a presentar sus trabajos en nuestra revista. La publicación y difusión de sus trabajos de investigación es uno de los caminos más efectivos para impulsar el desarrollo agroforestal en la región.

Glenn Galloway
 Director del Programa de Educación para el Desarrollo
 y la Conservación
 Decano de la Escuela de Posgrado
 CATIE

Avances de Investigación

Interacciones competitivas entre *Coffea arabica* y árboles maderables de rápido crecimiento en Pérez Zeledón, Costa Rica¹

Rudi van Kanten²; John Beer³; Götz Schroth⁴; Philippe Vaast⁵

Palabras claves: crecimiento; densidad de raíces finas; *Eucalyptus deglupta*; flujo de savia; sombra; *Terminalia ivorensis*.

RESUMEN

En asociaciones jóvenes de *Coffea arabica* (2 – 4 años de edad), el diámetro del tronco, la proyección de la copa y el nivel de sombra fueron mayores para la especie maderable de rápido crecimiento (*Terminalia ivorensis*) que para *Eucalyptus deglupta*. Los cafetos bajo maderables recibieron menos luz y transpiraron menos que los cafetos a pleno sol o bajo sombra del árbol de servicio (*Erythrina poeppigiana*). Este último tratamiento fue similar al de pleno sol, debido a mayores espaciamientos y dos podas al año. La producción de cerezas de café fue más alta bajo sombra de *E. deglupta* comparada con las otras dos asociaciones. Las raíces finas (diámetro < 2,0 mm) de cafetos y de árboles maderables presentaron una partición horizontal y *C. arabica* fue el competidor más fuerte. Los niveles menores de agua en el suelo y de humedad relativa del aire, así como los altos valores de temperaturas y de déficit de presión de vapor del aire en la época seca (febrero – marzo), indujeron una disminución del consumo de agua por parte de los cafetos y árboles (especialmente *E. deglupta* y *T. ivorensis*). La transpiración de los cafetos fue aumentada por un mayor crecimiento vegetativo (marzo – abril) y alta evapotranspiración debido a una alta radiación solar en esa época. Las asociaciones de *C. arabica* con árboles de sombra consumieron más agua que *C. arabica* a pleno sol en ambos períodos (seco y lluvioso). *E. deglupta* fue el árbol maderable de sombra más prometedor en las condiciones del ensayo (sin fuertes limitaciones hídricas).

Competitive interactions between *Coffea arabica* and fast-growing timber trees in Perez Zeledon, Costa Rica

Key words: *Eucalyptus deglupta*; fine-root density; growth; sap flow; shade; *Terminalia ivorensis*.

ABSTRACT

In young, 2 – 4 year old *Coffea arabica* associations, tree stem diameter, crown projection and shade level were higher for the fast-growing timber species (*Terminalia ivorensis*) than for *Eucalyptus deglupta*. Coffee plants under timber tree shade received less light and transpired less than those under the service tree (*Erythrina poeppigiana*). This latter treatment resembled the full sun treatment due to wider tree spacing and two pollardings per year. Coffee berry production was higher under *E. deglupta* than in the two other associations. There was a horizontal partitioning of coffee and timber tree fine roots (diameter < 2.0 mm), and *C. arabica* was the stronger competitor. Lower soil moisture content and relative air humidity, and higher air temperatures and vapor pressure deficit values in the dry season (February – March) resulted in a decrease of water consumption by coffee and trees (especially *E. deglupta* and *T. ivorensis*). Coffee transpiration was increased by a vegetative growth spurt (March – April) and high evapotranspiration demand due to high solar radiation during these months. The combined transpiration of coffee and associated trees was higher than that of coffee in full sun in both dry and rainy periods. *E. deglupta* was the more promising coffee timber shade tree under the trial conditions (without major water limitations).

INTRODUCCIÓN

La región de Pérez Zeledón, en el sur de Costa Rica, es una de las principales productoras de café (*Coffea arabica*) del país. Altitudes menores a los 1000 m y temperaturas del aire por encima de 24 °C clasifican a la zona como subóptima para café y hacen necesario el cultivo bajo sombra (Mata y Ramírez 2002). Además, los bajos precios del café en el mercado mundial convirtieron la asociación con árboles maderables de rápido

crecimiento en una opción atractiva (Galloway y Beer 1997), debido a que la futura venta de postes y madera puede diversificar e incrementar los ingresos económicos de los productores. Sin embargo, la inclusión de árboles de rápido crecimiento puede aumentar la competencia interespecífica por nutrientes, agua y luz (Beer *et al.* 1998).

¹ Basado en Kanten van, RF. 2003. Competitive interactions between *Coffea arabica* L. and fast-growing timber shade trees. Tesis Ph. D. Turrialba, CR, CATIE-UW Bangor.

² Ph.D. en Agroforestería Tropical, CATIE-UW Bangor Joint Ph. D. Program. Correo electrónico: rudivk@yahoo.com

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: jbeer@catie.ac.cr

⁴ National Institute for Research in the Amazon, Manaus, AM, Brasil. Correo electrónico: goetzschroth@web.de

⁵ CIRAD/CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: pvaast@catie.ac.cr

El propósito de este estudio fue comparar la productividad, tanto del café como de los árboles de sombra (los maderables *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* frente al árbol de servicio *Erythrina poeppigiana*), la distribución de las raíces finas de los dos componentes, el microclima y el consumo de agua para recomendar especies de sombra y/o métodos de manejo aptos para reducir la competencia interespecífica por agua en zonas como Pérez Zeledón, que tienen una estación seca marcada (3 – 4 meses).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El estudio se llevó a cabo de mayo de 1999 a julio del 2002 en una finca comercial de café (Verde Vigor S.A.) ubicada en el sur de Costa Rica (9°15'N, 83°29'O; 640 msnm). El sitio tiene un clima tropical lluvioso (Amw, clasificación de Köppen), y corresponde a la zona de vida Bosque Húmedo Tropical de Holdridge, con precipitación anual de 3516 mm (promedio de 1998 a 2002) y una temperatura promedio anual de 25,7 °C (promedio de 1986 a 1997). Hay una estación seca acentuada entre enero y marzo y la estación lluviosa es de mayo a diciembre. Los suelos fueron clasificados como Ustic Palehumult (USDA). La pendiente en las parcelas estudiadas varió entre 4 y 26%. Las altas temperaturas del aire, el estrés hídrico en la época seca y los suelos pobres (lo que, sin embargo, fue corregido por altas tasas de fertilizaciones y encladas) clasificaron el sitio como una zona subóptima para el cultivo del café.

Descripción del experimento principal

El diseño original fue de bloques completamente al azar con parcelas divididas y cuatro réplicas. Los cinco tratamientos principales fueron las asociaciones de *C. arabica* con los árboles maderables *E. deglupta* o *T.*

ivorensis con o sin fertilización suplementaria de los árboles o con árboles de servicio (*E. poeppigiana*) como control. Las subparcelas fueron café con aplicación localizada de fertilizante (en bandas 20 cm pendiente arriba de cada tronco de café) o en forma uniforme (la misma cantidad distribuida por toda el área correspondiente a una planta). La fertilización uniforme de los cafetos fue interrumpida en septiembre del 2000, cuando la finca usó la capa superior del suelo entre hileras para aporcarlos. La fertilización suplementaria de los árboles fue distribuida en un cuadro de 2 x 2 m con el tronco del árbol en el centro (Cuadro 1).

La plantación de *C. arabica* cv. Costa Rica 95 fue establecida en mayo de 1998, a 2 x 1 m, con hileras en dirección este-oeste. En julio de 1998 se establecieron los árboles *E. deglupta* o *T. ivorensis* a 6 x 6 m, o *E. poeppigiana* a 8 x 8 m. Las parcelas de café bajo maderables midieron 42 x 48 m y bajo el árbol de servicio 40 x 48 m. Las densidades de plantación (promedio \pm error estándar) fueron, respectivamente, 4723 \pm 37 para cafetos (dos plantas por posición, o sea 9500 plantas ha⁻¹), 250 \pm 6 para *E. deglupta* o *T. ivorensis*, y 146 \pm 6 árboles ha⁻¹ para *E. poeppigiana*. En cada subparcela se estableció un área útil de evaluación (6 x 12 m) con seis líneas de seis cafetos para las asociaciones con maderables y ocho líneas de cuatro cafetos para las asociaciones con *E. poeppigiana*.

Este experimento fue establecido en una antigua plantación de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Se hizo un arado a una profundidad de 50 cm previo al establecimiento de los cafetos y los árboles, debido a la compactación del suelo. *E. deglupta* fue podada una vez al año en los primeros dos años, removiendo ramas laterales hasta una altura de 3 m. Se podó *T. ivorensis*

Cuadro 1. Nutrientes aplicados de mayo de 1998 hasta mayo del 2002 en un ensayo de *Coffea arabica* – árboles de sombra en Pérez Zeledón, Costa Rica (kg ha⁻¹ año⁻¹)

Año	Especies	Nutrientes						
		N	P	K	Mg	S	B	Ca ⁽²⁾
1998	<i>C. arabica</i>	65	11	74	32	35	0	
	Árboles ⁽³⁾	0	7	0	0	0	0	
1999	<i>C. arabica</i>	188	6	82	39	18	3	648
	Árboles	19	1	11	3	3	<1	
2000	<i>C. arabica</i>	100	0	332	92	106	2	358
	Árboles	21	0	28	9	9	<1	
2001	<i>C. arabica</i>	112	8	78	22	46	2	850
2002	<i>C. arabica</i>	54	4	38	11	22	1	

⁽²⁾ La cal se aplicó de manera uniforme. ⁽³⁾ La fertilización de árboles (*Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis*) fue descontinuada después del 2000.

en varias ocasiones en los primeros tres años para regular la sombra (removiendo ramas laterales hasta una altura de 3 m) y para controlar la enfermedad “cancro néctrica” formada por un complejo de hongos (*Nectria* spp.). Esta última actividad fue complementada con pulverizaciones de hidróxido de cobre y benzimidazol. *E. poeppigiana* fue podado por primera vez en septiembre de 1999 y posteriormente en mayo y agosto cada año, distribuyendo los residuos de la poda por toda la parcela.

Metodología de toma de datos

Crecimiento y producción de cafetos y árboles

Se midió el diámetro de la copa de los árboles maderables a lo largo y cruzando las líneas de café para estimar la proyección de sus copas (CP en m^2 , asumiendo una proyección circular). Además, se midió la altura (h en m) y el diámetro del tronco a 1,3 m de altura (dap en cm) en cinco ocasiones (09-1999, 03-2000, 09-2000, 03-2001, 03-2002). Cada seis meses (inicio y fin de la estación lluviosa), se midió la altura (h en cm) y el diámetro basal del fuste de los cafetos (db en mm), 15 cm por encima del nivel del suelo. En los tratamientos con maderables, se identificaron cinco categorías de distancias de los cafetos al árbol de sombra más cercano (0,5; 1,5; 2,1; 2,5; y 3,2 m).

Se hizo una estimación de la cosecha en julio del 2001 (4 meses después de la floración) para el ciclo de producción 2001 – 2002 en las 12 subparcelas de cafetos con fertilización en bandas, en los tratamientos principales *E. deglupta* o *T. ivorensis* sin fertilización suplementaria de los árboles y en el control con *E. poeppigiana* (416 cafetos en total). La altura de los cafetos (incluyendo resiembras) varió entre 38 y 195 cm y el número de nudos totales en el fuste principal más alto de la planta (NT) entre 18 y 53. Las plantas fueron clasificadas en siete grupos (grupo I: 18 – 23 nudos en el fuste principal, seguido por seis grupos más con incrementos de cinco nudos adicionales por grupo). Se utilizó el número de bandolas productivas (BP) por cada planta y el número total de frutos sanos en desarrollo (FS) en ocho bandolas seleccionadas, distribuidas de manera sistemática de la parte alta a la parte baja de la planta, para calcular el número total de frutos en desarrollo por planta (FT). Este incluyó el cálculo del número promedio de frutos sanos por bandola ($PFB = FS/8$) por BP y un factor de 1,75, asumiendo un menor aporte de la segunda planta, no evaluada en el mismo hueco de plantío, de 75% de la planta evaluada; es decir, $FT = 1,75 \times BP \times PFB$.

El peso verde total de cerezas cosechables por planta (Pv en g) fue obtenido multiplicando FT por 1,5 (g), que representa el peso promedio de una cereza de café sana y completamente desarrollada ($Pv = FT \times 1,5$).

La cosecha por planta individual fue extrapolada a $kg\ ha^{-1}$:

$$\text{Cosecha estimada } (CE; kg\ ha^{-1}) = 4723 / NS \times \sum Pv \times 0,001 (kg\ g^{-1}) \quad [1]$$

Dado que hay 4723 huecos de plantío ha^{-1} (dos cafetos por hueco), NS es el número de huecos por subparcela (36 bajo maderables o 32 bajo *E. poeppigiana*) y $\sum Pv$ la suma de las cosechas estimadas por planta individual (g) en la subparcela. La cosecha real de cerezas de café en peso verde ($CR, kg\ ha^{-1}$) también fue evaluada en todas las mismas subparcelas para el ciclo de producción 2001-2002.

Estudio de raíces finas

Se evaluó el comportamiento de las raíces finas (diámetro $< 2\ mm$) en tres bloques, en las subparcelas de *C. arabica*, con fertilización en bandas bajo árboles maderables sin fertilizar, a una distancia de 1,6 m de los árboles en: (1) la banda de fertilización, (2) al lado opuesto de la hilera, y (3) exactamente entre hileras (espacios sin fertilizar en los últimos dos casos). Se hizo un muestreo preliminar en la época lluviosa (cafetos y árboles de 23–28 meses de edad) alrededor de tres árboles por réplica (bloque), con dos muestras de cada posición y profundidad (0–10; 10–20; y 20–40 cm) por árbol; o sea, un total de 324 muestras (2 tratamientos \times 3 réplicas \times 3 árboles \times 2 submuestras por árbol \times 3 posiciones de muestro \times 3 profundidades). El estudio principal (cafetos y árboles 36–45 meses después del transplante) incluyó muestreos de raíces finas durante y al final de la estación lluviosa, y durante la estación seca. Se hizo un muestreo de tres árboles en cada fecha de muestreo y cada réplica (tres bloques), con dos muestras de cada posición y profundidad (0–10 y 10–20 cm) por árbol; es decir, un total de 216 muestras por cada fecha de muestreo (2 tratamientos \times 3 réplicas \times 3 árboles \times 2 submuestras por árbol \times 3 posiciones de muestro \times 2 profundidades).

Se estudiaron también las raíces finas en tres plantaciones de *C. arabica*–*E. deglupta* ubicadas cerca del ensayo en la misma finca y establecidas en 1996, 1997 y 1999, con densidades de siembra semejantes, el mismo historial y tipo de manejo. Así se completó una pseudo-cronosecuencia de dos, tres, cuatro y cinco años (incluyendo los datos del estudio principal). Se seleccionaron tres árboles (cada uno fue considerado una réplica),

rodeados por cafetos sanos, en cada plantación en cada una de las fechas de muestreo, las cuales fueron durante y al final de la época lluviosa y durante la época seca del mismo año en que se hicieron muestreos en el estudio principal. Se tomaron dos muestras por cada posición y profundidad (0–10 y 10–20 cm) por árbol; es decir, un total de 108 muestras por fecha de muestreo (3 edades de plantación x 3 árboles x 2 submuestras por árbol x 3 posiciones de muestro x 2 profundidades).

Las muestras de raíces se tomaron con un barreno manual (diámetro interno de 8 cm). Las correspondientes submuestras de cada parcela (seis para los estudios preliminar y principal y dos para el estudio pseudo-cronosecuencial) fueron combinadas y homogeneizadas, y se seleccionó un porcentaje de esta mezcla (6,25 y 25%, respectivamente) de acuerdo con el método de Schroth y Kolbe (1994). El suelo y las raíces finas fueron lavados en una pila de agua con tamices de 2,0, 1,0 y 0,5 mm. Las raíces finas vivas de cada especie fueron separadas bajo un estereoscopio (6 x), con base en sus diferentes características morfológicas. La longitud total de las raíces finas de cada especie se determinó con el *software* WinRHIZO™ (Regent Instrument Inc., Quebec, Canadá), versión 3,9a con resolución del escáner en 300 dpi. Debido a dificultades en la separación de las impurezas orgánicas de las raíces finas, se estimó la longitud de estas con el método de interceptos de Tennant (1975), usando una bandeja transparente de 10 x 15 cm, cuadrantes de 1 x 1 cm, una lupa modelo de mesa (5x) y un contador manual mecánico. La longitud total de raíces finas (R en cm) de cada muestra compuesta fue dividida entre el volumen de suelo de la muestra correspondiente (cm^3) para determinar la densidad de raíces finas (RLD en cm cm^{-3}).

Estudio de flujo de savia

El flujo de savia (método de Van Bavel *et al.* 2000) en cafetos y árboles (3,5 a 4 años de edad) se midió en forma simultánea durante ocho meses, a partir de diciembre del 2001, en asociaciones de *C. arabica* fertilizadas de manera uniforme, con cada una de las tres diferentes especies arbóreas y en una parcela de café a pleno sol donde se había eliminado varios árboles de *E. deglupta*. Se seleccionaron ocho cafetos (dos por tratamiento) con diámetros del tallo entre 20,5 y 27,5 mm y alturas entre 149 y 196 cm. Los sensores comerciales Dynamax SGB19-WS y SGB25-WS fueron instalados 35 cm arriba del nivel del suelo en el fuste más alto del cafeto. Se calculó el flujo de savia de cada cafeto a nivel del área foliar (F_s en $\text{mL h}^{-1} \text{m}^{-2}$). El área foliar (AF en cm^2) de una hoja de café se calculó con: $AF = 0,6245 \times L$

x A ($r^2 = 0,98$), la cual fue desarrollada para el ensayo en septiembre del 2001 (datos no publicados), donde L y A (cm) son el largo y ancho de la hoja, respectivamente.

En cada uno de los cuatro árboles por asociación se instaló un par de agujas Granier (largo 22 mm y ancho 2,3 mm), colocadas a alturas de 1,30 m (aguja de referencia) y 1,45 m (aguja calentada). El procedimiento seguido se basó en Granier (1987), calculando la velocidad de flujo de savia (V en m s^{-1}) con:

$$V = 1,19 \times 10^{-4} \times K^{1,231} \quad [2]$$

donde K es un parámetro no dimensional calculado con base en la diferencia de la temperatura entre las dos agujas. La tasa de flujo de savia (F_s en litros h^{-1}) a nivel del árbol entero fue obtenida con:

$$F_s = A_s \times V \times 3600 (\text{s} \cdot \text{h}^{-1}) \times 100 (\text{cm} \cdot \text{m}^{-1}) \quad [3]$$

donde A_s es el área transversal de la albura (cm^2) a la altura de medición.

Se hicieron mediciones de lluvia (mm), velocidad del viento (u_2 en m s^{-1}), temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa del aire (HR en %), radiación global (R_G en W m^{-2}) y radiación fotosintéticamente activa (RAFA en $\mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con una estación micrometeorológica Campbell Scientific, simultáneamente con las lecturas de flujo de savia de febrero a julio del 2002.



Equipo para medir el flujo de savia, instalado en *Terminalia ivorensis* [A] y *Coffea arabica* [B], así como una celda para medir RAFA [C], instalada arriba del cafeto de medición (foto: R. van Kanten).

Con excepción de un cafeto que fue reemplazado en enero del 2002, se midieron los mismos ocho cafetos y 12 árboles durante todo el estudio, desde diciembre del 2001 a julio del 2002, en períodos de cinco días cada mes.

La albura (A_s en cm^2) fue estimada con discos de árboles recién cortados (11 para *E. deglupta* y *T. ivorensis* cada uno y dos para *E. poeppigiana*) que fueron sumergidos en una solución coloreada con azul de triptófano por tres horas para identificar la parte del disco correspondiente al área del xilema (la parte que absorbió el agua colorida). A_s varió entre 48 y 105; 84 y 106; y 59 y 82 cm^2 para *E. deglupta*, *T. ivorensis* y *E. poeppigiana*, respectivamente.

El contenido de agua en el suelo fue medido a una profundidad de 30 cm en cada una de las cuatro parcelas durante cada período de medición de flujo de savia, con un instrumento Moisture-Point MP-917 (Environmental Sensors Inc. E.S.I., Canadá), que opera de acuerdo con la técnica de Time Domain Reflectometry (TDR) (Pepin *et al.* 1995).

La evapotranspiración de referencia diaria (ET_0 en mm) fue estimada con la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), usando los datos de la estación micrometeorológica establecida en el ensayo. Los coeficientes de la resistencia de la copa del café y la altura del cultivo fueron considerados en 31 s m^{-1} y 170 cm (h promedio de los ocho cafetos en el estudio) para las cuatro parcelas, sin considerar las diferencias de sombreado.

Análisis estadísticos

Todos los datos fueron analizados con el programa SAS versión 8 (Instituto SAS Inc., Cary, NC, EUA 1999) aplicando análisis de varianza y pruebas de Student-Newman-Keuls (SNK).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo de *C. arabica* y los árboles maderables de rápido crecimiento

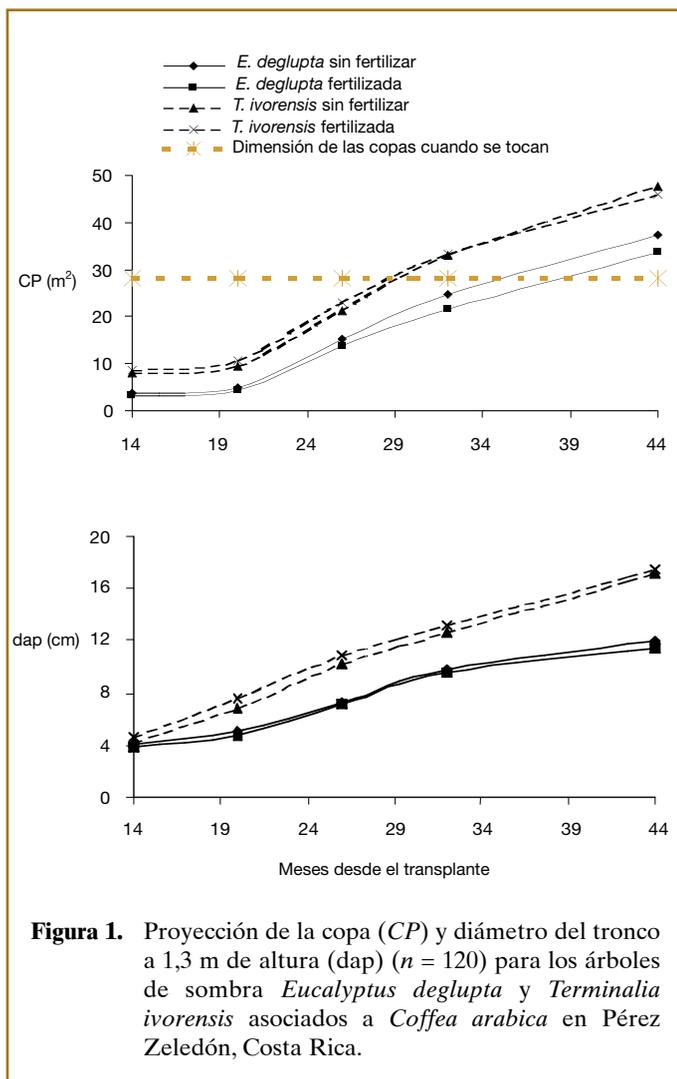
La proyección de la copa y el dap de *T. ivorensis* fueron mayores que los de *E. deglupta* ($p < 0,05$; Cuadro 2, Fig. 1) pero no hubo diferencia en la altura de árboles. Las copas de *T. ivorensis* y de *E. deglupta* se traslaparon a los 29 y 36 meses, lo que justifica un primer raleo antes de terminar su tercer año.

La sombra bajo *T. ivorensis* fue más densa (Fig. 2) que bajo *E. deglupta*. La RAFA más alta se registró al mediodía (entre 11:00 am y 1:00 pm). El porcentaje de luz infiltrado por las copas de los árboles, como porcentaje de RAFA comparado con a pleno sol, varió entre 48–65, 56–65 y 68–76% en la estación seca y 42–66, 16–47 y 67–100%, en la estación lluviosa, para *E. deglupta*, *T. ivorensis* y *E. poeppigiana*, respectivamente (Fig. 2). El mayor espaciamiento y la práctica de podas en *E. poeppigiana* hicieron que este tratamiento fuera muy similar al tratamiento a pleno sol en términos de sombra. La alta intercepción de RAFA por *T. ivorensis* durante la estación lluviosa se debió a un área foliar (determinada a cuatro años) casi tres veces mayor que la de *E. deglupta* ($189 \pm 22,2$ vs. $65 \pm 11,6 \text{ m}^2 \text{ árbol}^{-1}$; $n = 15$) (Alejandro Anzola, comunicación personal).

Cuadro 2. Altura (h), diámetro del tallo (dap) y proyección de la copa (CP) de árboles maderables de sombra en cafetales (*Coffea arabica*) en Pérez Zeledón, Costa Rica

Fuente del dato Seguimiento en el tiempo	Edad (meses)	h (m)	dap (cm)	CP (m^2)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	26	7,4 (0,42) ⁽²⁾	8,7 (0,55)	18,0 (2,20)
<i>Terminalia ivorensis</i>	26	6,9 (0,34)	11,1 (0,35)	20,3 (2,71)
<i>E. deglupta</i>	42	9,9 (0,29)	11,9 (0,46)	36,9 (2,35)
<i>T. ivorensis</i>	42	9,5 (0,28)	17,6 (0,58)	48,1 (2,98)
Pseudo-cronosecuencia				
<i>E. deglupta</i> 1999	25	6,3 (0,58)	8,9 (0,72)	18,5 (3,62)
<i>E. deglupta</i> 1998	38	9,3 (0,22)	11,0 (0,42)	32,1 (1,81)
<i>E. deglupta</i> 1997	49	11,4 (1,19)	14,9 (0,87)	50,8 (6,00)
<i>E. deglupta</i> 1996	61	13,0 (0,50)	20,8 (1,16)	64,9 (16,17)

⁽²⁾ Promedio (error estándar; $n = 9$ árboles).



Los valores promedio de RAFA (Fig. 2) fueron mayores que los niveles indicados como óptimos para *C. arabica*, de 300 y 600 μmol quanta $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para hojas en sombra y hojas a pleno sol, respectivamente, según Kumar y Tieszen (1980), excepto para cafetos bajo *T. ivorensis* en mayo. Maestri y Barros (1977) indican que temperaturas del aire arriba de 24 °C limitan una fotosíntesis óptima de *C. arabica*. En el ensayo, la temperatura del aire durante el día estaba casi siempre arriba de 24 °C (Van Kanten 2003). En estas condiciones subóptimas, la sombra de los árboles ayudó a reducir las oscilaciones y la magnitud de la temperatura foliar de los cafetos, confirmando lo reportado por Siles y Vaast (2003) en el mismo experimento.

Los cafetos involucrados en los estudios preliminares de raíces y en el principal todavía no habían alcanzado la altura máxima de 2,0 m del cultivar Costa Rica 95 (Cuadro 3), al contrario de los cafetos del estudio pseudo-

cronológico a partir de los cuatro años de edad. Durante las edades 2 – 5 años el diámetro basal de los cafetos siguió aumentando.



Terminalia ivorensis a los tres años de edad ya proyecta sombra excesiva sobre el café (Pérez Zeledón, Costa Rica. Foto: P. Vaast).

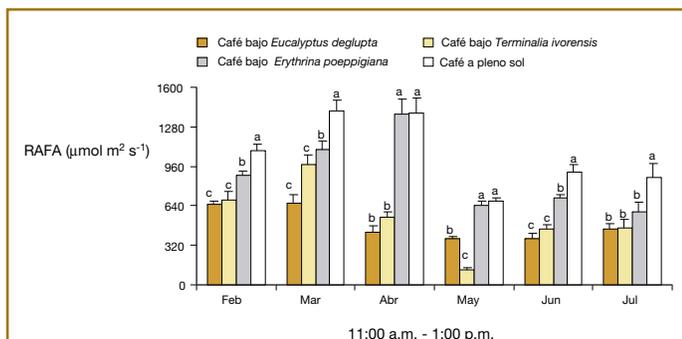


Figura 2. Radiación fotosintéticamente activa (RAFA) disponible para café (*Coffea arabica*) a pleno sol o bajo tres tipos de sombra, Costa Rica. Valores con la misma letra en el mismo mes no son significativamente diferentes (Student-Newman-Keuls: $p < 0,05$).

La cosecha real de café (*CR*) tuvo un coeficiente de correlación (r^2) de 0,95 con la cosecha de café estimada con base en la evaluación de ocho bandolas (*CE*) por planta cuando se ajustó a un modelo cuadrático:

$$CR = 0,00098 CE^2 + 0,4029 CE \quad r^2 = 0,95 \quad (p < 0,001) \quad [4]$$

Al ser sometidas a una prueba de *t*, *CR* y *CE* no mostraron diferencias significativas para *C. arabica* bajo *E. deglupta* ($p < 0,09$), *T. ivorensis* ($p < 0,37$) y *E. poeppigiana* ($p < 0,25$). La *CE* de cafetos bajo diferentes especies arbóreas no mostró diferencias significativas (Cuadro 4). Al contrario de estas predicciones, la cosecha real de cerezas de café fue más alta bajo sombra de *E. deglupta* que bajo sombra de *T. ivorensis* o *E. poeppigiana*.

Cuadro 3. Diámetro basal (*db*) y altura (*h*) para plantas de *Coffea arabica* bajo sombra de *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* en Pérez Zeledón, Costa Rica (promedio \pm error estándar; $n = 36$ cafetos)

Edades	<i>db</i> (mm)	<i>h</i> (cm)
26 meses		
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	34,8 \pm 0,5	114 \pm 1,4
<i>C. arabica</i> bajo <i>T. ivorensis</i>	31,6 \pm 0,5	107 \pm 1,2
42 meses		
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	41,0 \pm 0,6	166 \pm 1,6
<i>C. arabica</i> bajo <i>T. ivorensis</i>	34,7 \pm 0,7	155 \pm 2,0

En un estudio anterior en el mismo ensayo, Aguilar *et al.* (2001) concluyeron que la sombra densa bajo *T. ivorensis* resultó en una mayor proporción de nudos no productivos en cafetos de dos años de edad. Además, mayores fluctuaciones en el nivel de sombra bajo *T. ivorensis* a lo largo del año seguramente provocan

mayores niveles de estrés hídrico, de calor y radiación solar en los cafetos en esta asociación (problemas de adaptación).

Cuadro 4. Cosecha de cerezas estimada con base en la evaluación de ocho bandolas (*CE*) por planta y cosecha real de cerezas (*CR*) para cafetos (*Coffea arabica*) bajo tres tipos de sombra en Pérez Zeledón, Costa Rica

Tipo de sombra	<i>CE</i> (kg ha ⁻¹)	<i>CR</i> (kg ha ⁻¹)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	4374 \pm (830) a ^(z,y)	5095 \pm (925) a
<i>Terminalia ivorensis</i>	3261 \pm (767) a	2327 \pm (726) b
<i>Erythrina poeppigiana</i>	2762 \pm (733) a	2807 \pm (833) b

^(z)Promedio (error estándar; $n = 3$). ^(y) Cosechas con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Raíces finas de los sistemas

La densidad de las raíces finas (*RLD*) de los cafetos y los árboles tendió a ser menor en la posición entre hileras, comparada con las dos posiciones cerca del tronco del café (Cuadro 5). Menores tasas de *RLD* (*RLD* del cafeto dividida por la del árbol para la misma muestra) y, a la vez, valores absolutos de *RLD* de cafetos y árboles mayores en el estrato 0 – 10 cm, indicaron una mayor probabilidad de competencia en este estrato y, sobre todo, en la posición de la banda de fertilización de los cafetos. Posiblemente, la combinación de concentraciones menores de Ca, Mg y un pH (H_2O) menor, además del hecho de que la finca usó el suelo entre las hileras para aporcar los cafetos, redujeron la presencia de raíces finas de ambas especies entre hileras.

La *RLD* de los cafetos (ejemplo del período de muestreo al final de la época lluviosa en el Cuadro 5) fue mayor en las asociaciones de 4 y 5 años, comparada con las de 2 y 3 años. Un aumento de las raíces finas relativamente mayor en los cafetos que en *E. deglupta* indica que, contrario a lo esperado, las raíces finas de *C. arabica* estaban desplazando las de los árboles. En el ensayo principal, la presencia de raíces finas del café y del árbol en la banda de fertilización fue mayor que la presencia de raíces finas en el lado opuesto de esta banda y entre hileras, lo que coincide con observaciones de Schaller *et al.* (2003), quienes estudiaron las mismas posiciones en asociaciones de *C. arabica* y *E. deglupta* de 4 y 5 años de edad en Turrialba, Costa Rica, en diferentes épocas lluviosas. Al igual que en estudios anteriores de *C. arabica* con *E. deglupta* en Costa Rica (Morales y Beer 1998, Schaller *et al.* 2003), en este estudio se encontró que conforme la edad de las asociaciones avanzaba se incrementó la *RLD* de los árboles entre líneas de cafetos.

Cuadro 5. Densidad de raíces finas (RLD en cm cm⁻³) a 1,6 m del árbol para *Coffea arabica* y los árboles de sombra *Eucalyptus deglupta* y *Terminalia ivorensis* (profundidad 0–10 cm), Pérez Zeledón, Costa Rica

Estudio	Posiciones ⁽²⁾		
	Fertilizada	Sin fertilizar	Entre líneas
Estudio preliminar (edad 26 meses)			
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	2,34 (0,39) ⁽³⁾	2,14 (0,26)	1,32 (0,41)
<i>E. deglupta</i>	1,37 (0,02)	1,17 (0,30)	0,75 (0,20)
<i>C. arabica</i> bajo <i>T. ivorensis</i>	3,32 (0,90)	3,12 (0,61)	2,40 (0,96)
<i>T. ivorensis</i>	1,22 (0,38)	1,37 (0,69)	0,82 (0,19)
Estudio principal al final de la época lluviosa (edad 42 meses)			
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	1,88 (0,59)	1,47 (0,37)	1,15 (0,81)
<i>E. deglupta</i>	1,96 (0,63)	1,81 (0,42)	0,79 (0,11)
<i>C. arabica</i> bajo <i>T. ivorensis</i>	0,98 (0,38)	1,07 (0,31)	0,67 (0,29)
<i>T. ivorensis</i>	0,77 (0,19)	0,97 (0,32)	0,81 (0,10)
Estudio pseudo-cronológico al final de la época lluviosa			
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	0,81 (0,23)	0,69 (0,19)	1,04 (0,50)
<i>E. deglupta</i> (edad 2 años)	0,74 (0,43)	0,36 (0,11)	0,95 (0,27)
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	1,88 (0,59)	1,07 (0,24)	1,47 (0,37)
<i>E. deglupta</i> (edad 3 años)	1,96 (0,63)	0,65 (0,08)	1,81 (0,42)
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	3,40 (0,25)	1,18 (0,05)	3,44 (0,50)
<i>E. deglupta</i> (edad 4 años)	0,61 (0,13)	0,15 (0,03)	1,85 (1,11)
<i>C. arabica</i> bajo <i>E. deglupta</i>	5,51 (0,98)	1,51 (0,43)	3,51 (1,10)
<i>E. deglupta</i> (edad 5 años)	1,44 (0,24)	0,34 (0,13)	1,18 (0,19)

⁽²⁾ Fertilizada = cerca del cafeto en la banda de fertilización; Sin fertilizar = cerca del cafeto opuesto a la banda de fertilización; Entre líneas = equidistante a dos líneas de cafetos.

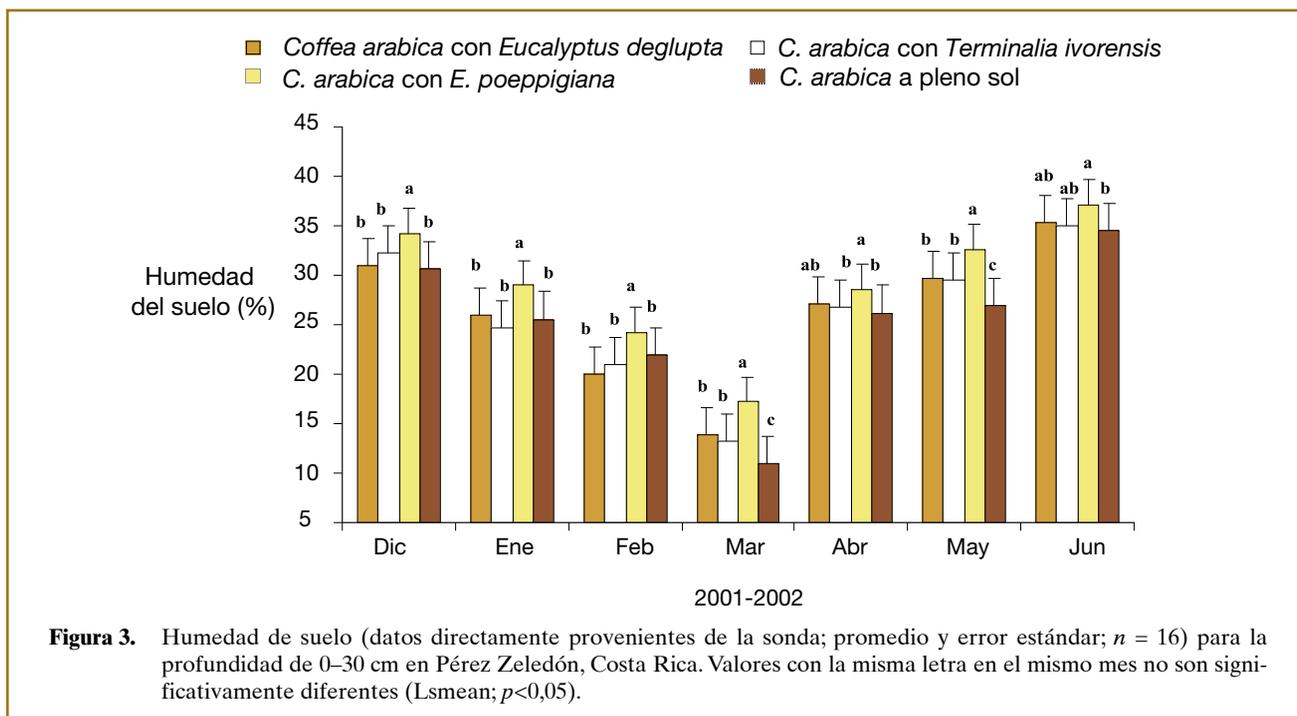
⁽³⁾ Promedio (error estándar; $n = 9$).

Los resultados indican una partición entre los sistemas radiculares de *E. deglupta* y los cafetos, que tienden a explorar estratos diferentes, lo cual es una característica favorable para *E. deglupta* como sombra para café.

Humedad del suelo y consumo de agua de las plantas

La humedad del suelo (a 30 cm de profundidad) varió entre 11 y 37% (Fig. 3) para el período de diciembre 2001 a junio 2002. El contenido del agua del suelo fue casi siempre mayor ($p < 0,05$) en el tratamiento con *E. poeppigiana* que en los otros tres tratamientos. El contenido de agua del suelo fue menor para todos los tratamientos al final de la época seca (marzo). Jiménez y Alfaro (1999) también observaron mayores contenidos de agua en el suelo (0–60 cm) de asociaciones de café–*E. poeppigiana* y café a pleno sol, comparado con asociaciones de café–*E. deglupta* durante el período seco en el Valle Central de Costa Rica.

La evapotranspiración de referencia diaria para los días de medición del flujo de savia varió entre 2,2 y 3,7 mm día⁻¹ entre febrero y julio del 2002 (Fig. 4), excepto para el mes más caliente, abril, con 5,7 mm día⁻¹. La temperatura promedio del aire fue semejante para las épocas seca y lluviosa (23,4 y 23,5 °C), pero las temperaturas máximas fueron mayores en la época seca (32,5 vs. 27,5 °C). Esto implica valores mínimos de HR más bajos (HR alrededor de 32% para febrero hasta abril y de 52% para mayo hasta julio), lo cual resultó en un incremento rápido de la transpiración de los cafetos al inicio del día junto con incrementos de la RAFA y del déficit de presión de vapor (DPV) del aire durante el período seco hasta alrededor de las 10:00 a.m., cuando el DPV alcanzó valores por encima de los 1,5 k Pa, lo que probablemente indujo un cierre estomatal de las hojas de café (Gutiérrez *et al.* 1994).



En febrero (época seca), el consumo de agua de los cafetos por m^2 de área foliar fue más bajo en los sistemas con maderables que con *E. poeppigiana* o a pleno sol (Fig. 4b). Entre febrero y marzo, se observó una reducción en el consumo de agua por los cafetos solamente en la asociación con *E. poeppigiana* en comparación con los otros tres tratamientos (Fig. 4b) y, a la vez, un aumento en el consumo de agua por los árboles de *E. poeppigiana* (Fig. 4a).

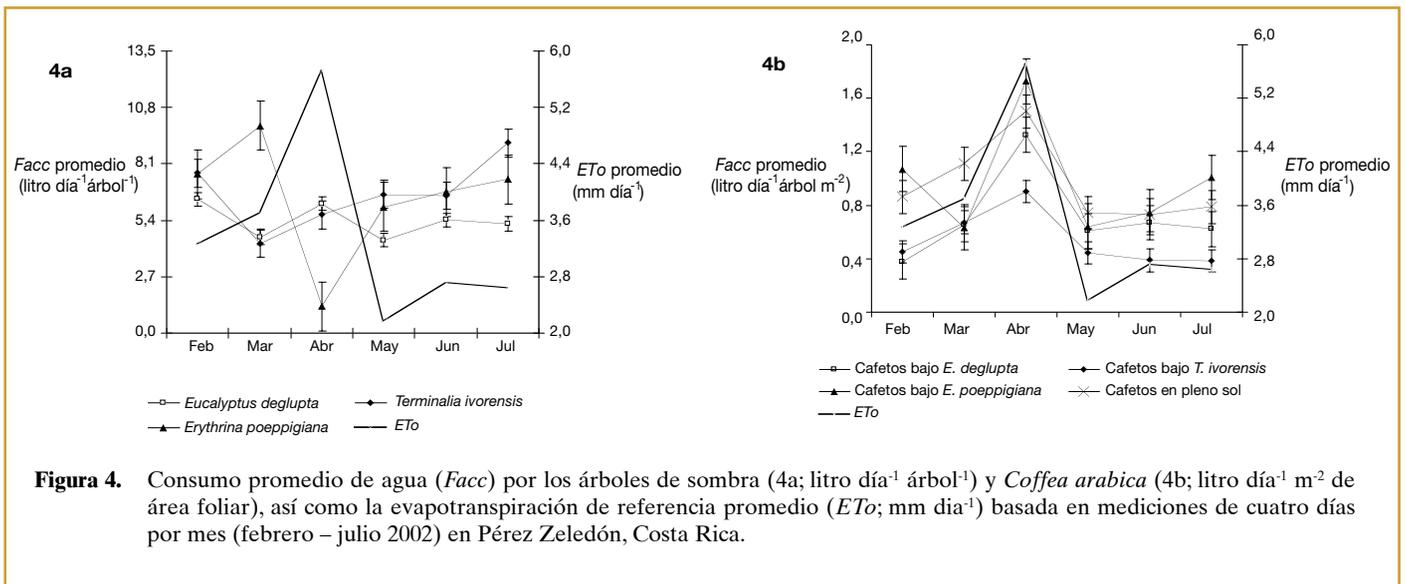
La disminución fuerte del nivel de sombra durante el período seco debida a la caída natural de hojas de los árboles de sombra provocó altos niveles de estrés hídrico, calor y radiación solar en los cafetos más protegidos por esos árboles durante el resto del año. En la época lluviosa, el consumo de agua por los cafetos siguió las curvas de RAFA y DPV abajo del umbral de 1,5 k Pa durante el día, debido a bajos valores de la DPV (Kanten 2003). La demanda de agua de los cafetos también fue determinada por su propio estado fenológico.

Un mayor crecimiento vegetativo que empezó en marzo (luego de una precipitación de 87 mm en la primer quincena del mes y que culminó en abril) correspondió con un incremento en la transpiración de los cafetos en ese mes para todos los tratamientos, excepto la asociación con *E. poeppigiana* (Fig. 4b). El mayor consumo de agua por los cafetos en los cuatro tratamientos fue en el mes de abril, debido a una alta evapotranspiración

causada por una elevada radiación solar. Durante este mes, el consumo de agua por parte de los cafetos bajo *E. poeppigiana* fue más alto ($p < 0,05$) que el de los cafetos bajo árboles maderables.

Durante los meses (junio y julio) del período lluvioso (Fig. 4), la menor transpiración de los cafetos bajo maderables, especialmente con *T. ivorensis*, en comparación con pleno sol o bajo *E. poeppigiana*, fue debida a menos RAFA y menores temperaturas foliares del café bajo los árboles maderables (Siles y Vaast 2003).

Los meses de máximo y mínimo consumo de agua no coincidieron para el árbol de servicio y las dos especies maderables (Fig. 4a) debido a diferencias fenológicas, especialmente la caída de hojas. Las asociaciones de *C. arabica* con árboles de sombra consumieron más agua ($p < 0,05$) que *C. arabica* a pleno sol. El consumo de agua mínimo del café a pleno sol ($12,4 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) ocurrió en junio (durante la época lluviosa) y el consumo máximo ($25,9 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) en abril, en la transición a la época lluviosa. El consumo de agua mínimo y máximo para las asociaciones de *C. arabica* con árboles varió entre 13,8–28,6; 15,8–25,5; y 15,1–41,2 $\text{m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para las asociaciones con *E. deglupta*, *T. ivorensis* y *E. poeppigiana*, respectivamente. El porcentaje de agua consumido por los cafetos varió entre 83–94; 67–87; y 84–99% del total de la asociación bajo *E. deglupta*, *T. ivorensis* y *E. poeppigiana*, respectivamente.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El crecimiento (proyección de la copa y dap) de *T. ivorensis* (1-4 años) fue superior al de *E. deglupta* y, por lo tanto, dio sombra más rápidamente al café. Sin embargo, hay que considerar raleos y/o podas fuertes de las dos especies maderables antes de los tres años para evitar un sombreado excesivo del café, además de mejorar la forma de los maderables.
- La producción de cerezas de café fue mayor bajo la sombra más estable a lo largo del año de *E. deglupta*, comparada con las otras dos asociaciones con árboles.
- Un criterio favorable para seleccionar árboles de sombra es la tendencia de partición de los sistemas radicales de los árboles maderables y *C. arabica*. Las raíces finas de *E. deglupta* tendieron a estar más presentes en el espacio entre las hileras de los cafetos (partición horizontal).
- Aunque la competencia radicular interespecífica todavía no fue detectada, esta puede aumentar con la edad de las plantaciones. Sin embargo, el hecho de que con el tiempo *C. arabica* parece desplazar las raíces finas de los árboles maderables (contrario a lo esperado), sugiere que esta competencia interespecífica no va a ser en detrimento de *C. arabica*.
- En los meses secos (febrero y marzo), cuando el nivel de agua en el suelo fue más bajo y se observaron las condiciones climáticas más adversas (baja humedad relativa del aire, valores muy altos de la temperatura y del VDP del aire, e intensidades mayores de RAFA), hubo un menor consumo de agua por los cafetos y árboles. La transpiración de los cafetos también fue determinada por su propio estado fenológico, donde un mayor crecimiento vegetativo, iniciando en marzo y culminando en

abril, correspondió con mayor transpiración de los cafetos. Menores incidencias de luz para los cafetos bajo maderables a lo largo del estudio correspondieron con menor transpiración de estos cafetos.

- Las asociaciones de *C. arabica* con árboles de sombra consumieron más agua que *C. arabica* a pleno sol, y el consumo de agua por parte de los cafetos representó la mayor parte del consumo total de esas asociaciones.
- La necesidad de incluir mano de obra adicional para las podas de *T. ivorensis*, así como la menor transpiración y producción de cerezas por los cafetos bajo esa especie, indican que *E. deglupta* es una mejor opción de sombra para *C. arabica* dentro de los maderables probados en las condiciones de este ensayo. En la zona subóptima de producción de café en Pérez Zeledón (suelos pobres, temperatura alta), la sombra es esencial para los cafetos en formación. El árbol de servicio *E. poeppigiana* con podas drásticas y espaciamiento ancho no suministró suficiente sombra a los cafetos, lo cual fue evidenciado por el menor crecimiento y producción de los cafetos en este tratamiento. Para determinar cuál especie arbórea maderable de rápido crecimiento se presta mejor para la asociación con *C. arabica*, es necesario seguir estudiando las interacciones complejas entre *C. arabica* y árboles maderables de sombra en términos de modificación del microclima (radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa del aire); disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo; efecto de los árboles sobre la producción y calidad de las cerezas de café; y también del crecimiento y del aporte de los árboles al sistema (volumen y calidad de la madera; aporte de biomasa al sistema).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la finca Verde Vigor S.A. por el establecimiento y el mantenimiento del ensayo, así como a la oficina regional del ICAFE (Instituto Costarricense del Café) por la asistencia técnica y logística; al proyecto TÖB (Tropenökologisches Begleitprogramm, realizado por la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)) por financiar el establecimiento del ensayo y los costos operacionales; y al CATIE por apoyar en el manejo del ensayo y facilitar los laboratorios. El Dr. O. Rouspard del CIRAD ofreció información técnica acerca de las agujas Granier. El proyecto CATIE/CIRAD CASCA (Inco-Dev N° ICA4-2001-10071) y el Centro Científico y Cultural de la Embajada de Francia en Costa Rica financiaron el equipo de flujo de savia. También se agradece al Dr. J.M. Harmand por sus valiosos consejos; a Manuel Menjívar y los demás asistentes por el apoyo de campo; a Joaquín Barbosa por la separación de raíces; a Gustavo López por el apoyo en el análisis estadístico; y a Guillermo Detlefsen por revisar el texto en Español.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aguilar, AC; Beer, J; Vaast, P; Jiménez, F; Staver, C; Klein, C. 2001. Desarrollo del café asociado con *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* en la etapa de establecimiento. *Agroforestería en las Américas* 8(30):28–31.
- Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D; Smith, M. 1998. Crop evaporation: Guidelines for computing crop water requirements. Roma, IT, FAO. 300 p. (FAO Irrigation and drainage paper no. 56).
- Bavel van, MG; Bavel van, CHM; Woodie, V; Perry, D; Thanoon, S. 2000. Flow32™ windows based sap flow monitoring system installation and operation manual. Houston, TX, Dynamax Inc. 150 p.
- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38(1–3):139–164.
- Galloway, G; Beer, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. CATIE, Turrialba, CR. 168 p. (Serie Técnica, Informe Técnico no. 285).
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3:309–320.
- Gutiérrez, MV; Meinzer, FC; Grantz, DA. 1994. Regulation of transpiration in coffee hedgerows: co-variation of environmental variables and apparent responses of stomata to wind and humidity. *Plant Cell Environment* 17:1305–1313.
- Jiménez, F; Alfaro, R. 1999. Available soil water in a *Coffea arabica*-*Erythrina poeppigiana*, *C. arabica*-*Eucalyptus deglupta* and *C. arabica* monoculture plantations. In *Semana Científica del CATIE* (4, 1999, Turrialba, CR). Actas. Turrialba, CR, CATIE. p. 203–206.
- Kanten van, RF. 2003. Competitive interactions between *Coffea arabica* L. and fast-growing timber shade trees. Tesis Ph.D. CATIE – UW Bangor, Turrialba, Costa Rica. 162 p.
- Kumar, D; Tieszen, LL. 1980. Photosynthesis in *Coffea arabica*. I. Effects of light and temperature. *Experimental Agriculture* 16:13–19.
- Maestri, M; Barros, RS. 1977. Coffee. In Alvim, PT; Kozlowski, TT. eds. *Ecophysiology of tropical crops*. New York, US, Academic Press. p. 249–278.
- Mata, RA; Ramírez, JA. 2002. Caracterización de suelos de café en el cantón de Pérez Zeledón. Heredia, CR, Icafé–Cicafé. 101 p.
- Morales, EAR; Beer, J. 1998. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 5(17-18):44–48.
- Pepin, S; Livingston, NJ; Hook, WR. 1995. Temperature-dependent measurement errors in the Time Domain Reflectometry determinations of soil water. *Soil Science Society of America Journal* 59(1):38–43.
- Schaller, M; Schroth, G; Beer, J; Jiménez, F. 2003. Species and site characteristics that permit the association of fast-growing trees with crops: the case of *Eucalyptus deglupta* as coffee shade in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 175(1–3):205–215.
- Schroth, G; Kolbe, E. 1994. A method of processing soil core samples for root studies by subsampling. *Biology Fertility and Soils* 18:60–62.
- Siles, PDG; Vaast, P. 2003. Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y sin sombra. *Agroforestería en las Américas* 9(35-36):44–49.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology* 63(3):995–1001.

Avances de Investigación

Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica de fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua¹

Alfredo Ruiz²; Muhammad Ibrahim³; Bruno Locatelli³; Hernán J. Andrade⁴; John Beer³

Palabras claves: árboles dispersos; costo de oportunidad; mano de obra; pastos mejorados; pastos nativos; servicios ambientales.

RESUMEN

Se evaluó el almacenamiento de carbono (C) en pastos tradicionales (*Hyparrhenia rufa*, *Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum*) y pastos mejorados (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*), con árboles dispersos y sin ellos (más de 15 especies), y en áreas de regeneración natural (tacotales; edades entre 5-20 años), en el municipio de Matiguás, Nicaragua. El C total almacenado en los tacotales (201 tC ha⁻¹) fue superior al almacenado en pastos con (164-170 tC ha⁻¹) árboles y sin ellos (151-159 tC ha⁻¹). Los sistemas de pasturas mejoradas con árboles maximizan el ingreso (óptimo económico) del productor. El tacotal es el que más C almacena (óptimo ecológico), pero genera bajos ingresos al agricultor. La conversión de la mitad de la finca a un sistema silvopastoril con pasturas mejoradas, y la otra mitad a bosque secundario, puede incrementar el ingreso actual en un 43% y aumentar el almacenamiento de C en 15 tC ha⁻¹. El costo de oportunidad de incrementar el secuestro de C por el desarrollo de las áreas boscosas en las fincas ganaderas osciló entre 3,2 y 26,4 US\$ tC⁻¹. Un cambio de uso del suelo de ganadería extensiva a bosques secundarios puede tener un fuerte impacto negativo en el empleo (-47%). En cambio, transformar los sistemas actuales a pastos mejorados con árboles, con algunas áreas en tacotales, puede tener un impacto positivo en la demanda de trabajo (+74%).

Carbon fixation and storage in silvopastoral systems, and economic competitiveness, in livestock farms in Matiguas, Nicaragua

Key words: dispersed trees; opportunity cost; labour; improved pastures; native pastures; environmental services.

ABSTRACT

Carbon (C) storage was evaluated in traditional pastures (*Hyparrhenia rufa*, *Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum*) and improved pastures (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*), with and without dispersed trees (over 15 species), and in natural regeneration (secondary forest; 5-20 years of age) in the district of Matiguas, Nicaragua. Carbon storage in the secondary forest (201 tC ha⁻¹) was greater than in pasture systems with (164-170 tC ha⁻¹) or without trees (151-159 tC ha⁻¹). The improved pasture system with trees maximizes farmers' revenues (economic optimum), while secondary forests store more C (ecological optimum) but with less revenue to the farmers. Converting 50% of a farm to silvopastoral systems with improved grasses, and the other 50% to secondary forest, could increase actual revenues by up to 43% and at the same time increase C storage by 15 tC ha⁻¹. The opportunity cost of increasing C sequestration by increasing forest areas in livestock farms is between 3.2 and 26.4 US\$ tC⁻¹. A land use change from extensive cattle rising to secondary forests could have a negative impact on employment (-47%). On the other hand, a change to systems with improved grasses and trees, with some areas in natural regeneration, could increase labour demand (+74%).

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas que más contribuye al calentamiento global (IPCC 2001). Se puede mitigar sus efectos almacenándolo en la biomasa vegetal (mediante la fotosíntesis) y en la materia orgánica del suelo derivada de esta fitomasa. Comparados con las pasturas puras, los

sistemas silvopastoriles (SSP) pueden aumentar la fijación de C, y son una alternativa de producción ecológicamente sostenible para las fincas ganaderas (Albrecht y Kandji 2003, Beer *et al.* 2003), ya que ayudan a revertir procesos de degradación muy evidentes en más del 50% de las pasturas

¹ Basado en: Ruiz G, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical. CATIE, Sede Central. Correo electrónico: yuri@ns.uca.edu.ni (autor para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería. CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: mibrahim@catie.ac.cr; bruno.locatelli@cirad.fr (CIRAD-CATIE); jbeer@catie.ac.cr

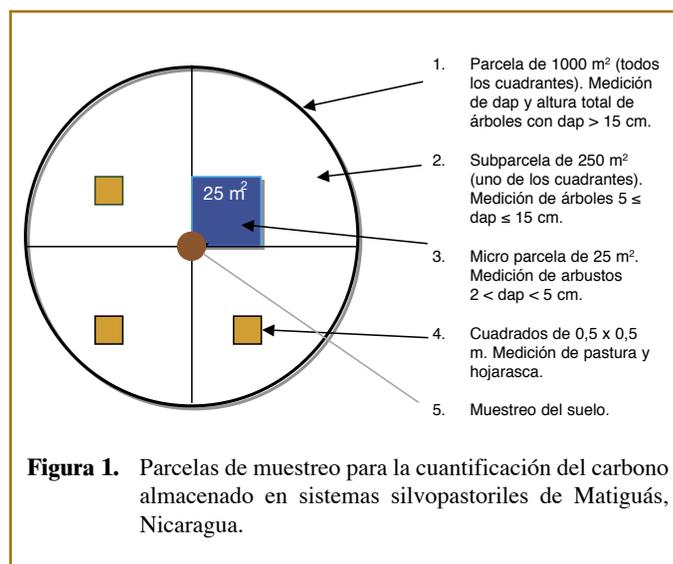
⁴ Candidato doctorado en Agroforestería. CATIE-Universidad de Gales (Bangor). Correo electrónico: handrade@catie.ac.cr

de América Central (Szott *et al.* 2000). Con la ratificación del protocolo de Kyoto (UNFCC 2005), las posibilidades de recibir pagos por servicios ambientales, en este caso por secuestro de carbono, han aumentado y, por ende, la adopción de SSP puede mejorar la competitividad económica de las fincas ganaderas. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad socioeconómica y la capacidad de almacenamiento de C en la biomasa y el suelo de pasturas nativas, pasturas mejoradas, sistemas silvopastoriles y tacotales (regeneración secundaria) en Matiguás, Nicaragua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó entre febrero y agosto del 2002 en 34 fincas privadas, de 10 a 200 ha, en las partes bajas (200-400 msnm) de la microcuenca del Río Bul-Bul, en el municipio de Matiguás, Nicaragua (85°27'N y 12°50'O). Las precipitaciones en la zona oscilan entre 1200 y 1800 mm año⁻¹, con una estación seca entre febrero y abril. La temperatura media anual es de 27 °C.

Se seleccionaron aleatoriamente 34 de 46 fincas ganaderas de la microcuenca, de una base de datos del proyecto GEF-silvopastoril (CATIE-GEF-Banco Mundial; Cuadro 1). En cada finca se identificó, utilizando imágenes de satélite y verificación en el campo, las áreas con pasto natural en monocultivo, pasto mejorado en monocultivo, pasto natural con árboles, pasto mejorado con árboles, y tacotal (regeneración natural; edad entre 5 y 20 años). Para cada sistema de uso del suelo se seleccionó 10 áreas, la mitad con pendiente del terreno < 20% y la otra mitad con > 20% (en total 50 áreas en 35 fincas). En estas áreas, se evaluó la biomasa y el C almacenado en la biomasa arbórea aérea, biomasa de pasturas, C orgánico de suelos y la hojarasca. En los SSP, se emplearon parcelas temporales de muestreo de 1000 m² (Fig. 1). En los tacotales, las parcelas principales fueron de 400 m².



La biomasa arbórea aérea (por encima del suelo) se cuantificó con base en un modelo de biomasa desarrollado en este estudio y en mediciones de árboles en pie en las parcelas de muestreo. El modelo de biomasa se derivó de una base de datos de un muestreo destructivo de 53 árboles, de las mismas parcelas, con dap entre 5 y 85 cm, clasificados en tres grupos (<10, 10-30 y >30 cm). Se seleccionó el mejor modelo (entre 29) usando la altura total (ht) y/o dap como variables independientes. Las especies arbóreas incluidas en este muestreo fueron *Cassia grandis*, *Platymiscium pleiostachyum*, *Albizia saman*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea*. La biomasa de pasturas y de hojarasca se estimó en cuadrantes de 50 x 50 cm (Fig. 1). En pasturas en monocultivo, se muestreó cada 10 m en transectos de 50 m. El C orgánico del suelo se calculó con base en el contenido de materia orgánica y la densidad aparente (MacDicken 1997) en tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm; Ecuación 1). La materia orgánica se estimó mediante al técnica de Walkley y Black (1938) con muestras compuestas, mientras

Cuadro 1. Características básicas de las fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua

Tipo de productores	Número de fincas	Área (ha finca ⁻¹)	Valor de la tierra (US\$ finca ⁻¹)	Capital (US\$ ha ⁻¹)	No. de vacas (animales finca ⁻¹)
Pequeño	21	19±6	4468	61±35	14±9
Mediano	15	60±26	13027	174±184	32±22
Grande	10	128±52	42883	214±210	64±35
Total	46	57±51	15858	133±158	31±28

Fuente: CATIE-Nitlapan, proyecto GEF-silvopastoril (datos sin publicar).

que la densidad aparente se calculó por medio del método del cilindro en el centro de la parcela.

Ecuación 1

$$COS = CO \times da \times P_s$$

Donde:

COS: C orgánico del suelo (t ha⁻¹)

CO: C orgánico en suelo (%; Walkley y Black 1938)

da: Densidad aparente (g cm⁻³)

P_s: Profundidad del suelo (cm)

Se evaluaron los indicadores técnicos productivos (rendimiento de leche, carga animal, precios de la leche) y variables económicas (costos de producción, ingresos netos, costo de oportunidad de incrementar el C en las fincas, impacto de los cambios de uso del suelo en el empleo y el ingreso) de las fincas. El efecto de cada uso del suelo en la economía familiar se calculó con base en un modelo de regresión lineal múltiple, donde las áreas dedicadas a cada uso del suelo son las variables independientes. Se simuló el ingreso esperado y la acumulación de C en nueve escenarios de uso del suelo. El servicio ambiental de almacenamiento de C se valoró mediante el costo de oportunidad de cambios de uso del suelo entre los escenarios estudiados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenamiento de carbono

El C total almacenado en los tacotales (201 tC ha⁻¹) fue mayor que el almacenado en los pastos en monocultivo y en SSP (151-159 y 164-170 tC ha⁻¹, respectivamente; Cuadro 2). Las pasturas mejoradas (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*) no almacenaron más C que los pastos tradicionales (*Hyparrhenia rufa*,

Paspalum notatum y *Paspalum virgatum*). Lo contrario ha sido reportado en las sabanas de América del Sur (Fisher *et al.* 1994, Fisher y Trujillo 1999). López (1998) encontró que el pasto guinea (*P. maximum*) puro almacena más C en el suelo que en asociación con *Cordia alliodora*, debido posiblemente a diferencias de fertilidad del suelo en los distintos sitios comparados (el suelo en pasturas puras presentó mayores contenidos de N). Mora (2001) encontró que los suelos bajo *Cynodon nlemfuensis* almacenan más C que bajo *Pennisetum clandestinum*, y que se almacena más C en suelos bajo pastos a pleno sol que en los casos de asocio con árboles.

Los tacotales almacenaron más C total, debido a la mayor cantidad de C en el mantillo. Más del 80% del total del C almacenado en todos los sistemas se encuentra en los suelos, confirmando los resultados de López (1998), quien encontró el 86% del C del sistema *P. maximum* con *C. alliodora* en el suelo. En contraste, en un bosque o una plantación, la mitad del C del ecosistema se encuentra en la parte aérea (Dixon *et al.* 1995).

Evaluación económica y valoración de servicios ambientales por almacenamiento de carbono

Los sistemas de pasturas mejoradas con árboles constituyen la opción que maximiza el ingreso (óptimo económico). El tacotal es el sistema que más C almacena (óptimo ecológico), pero generó bajos ingresos al productor (Cuadro 3). Al manejar pasturas mejoradas con árboles en toda la finca, se duplica el ingreso esperado respecto a la situación actual, manteniendo el mismo almacenamiento de C. Las pasturas tradicionales con árboles arrojan pérdidas a los ganaderos de la zona de estudio.

Cuadro 2. Carbono (C) almacenado en el pasto, mantillo, árboles y suelos de cuatro sistemas de uso del suelo en Matiguás, Nicaragua

Sistemas	Almacenamiento de C (tC ha ⁻¹)			Total
	Pasto y mantillo	Árboles	Suelo	
PNSA ⁽²⁾	1,4 ± 0,2 c ⁽³⁾	—	150 ± 15 a	151 ± 16 b
PNCA	1,0 ± 0,2 d	8,2 ± 3,0 b	155 ± 13 a	164 ± 14 b
PMSA	1,6 ± 0,2 c	—	158 ± 15 a	159 ± 16 b
PMCA	2,5 ± 0,2 b	12,5 ± 3,5 b	155 ± 15 a	170 ± 16 b
Tacotal	15,6 ± 1,6 a ⁽³⁾	17,5 ± 3,6 a	168 ± 18 a	201 ± 19 a

⁽²⁾ PNSA: pasto nativo sin árboles; PNCA: pasto nativo con árboles; PMSA: pasto mejorado sin árboles; PMCA: pasto mejorado con árboles. ⁽³⁾ Medias en la misma columna seguidas por la misma letra indican que no hay diferencias significativas ($p < 0,05$). ⁽³⁾ Solamente mantillo.

Cuadro 4. Empleos generados por el cambio de uso de suelo a pastos mejorados con árboles y tacotales en Matiguás, Nicaragua

Tipo	Familias (no.)	Tamaño de finca (ha)	Tierra total (ha)	Empleos generados por el cambio de uso del suelo (no. de jornales)		
				Actual ⁽²⁾	Árboles con pastos mejorados ⁽³⁾	Tacotal o bosque ⁽³⁾
Asalariados	1000	0	0	0	0	0
Campeños pobres	900	10-30	25000	3124	5000	1785
Campeños agricultores	500	30-70	25000	1250	2500	625
Medianos	200	70-250	32000	773	1454	400
Total	2600		82000	5135	8954	2810

Fuente: Proyecto GEF-silvopastoril.

⁽²⁾ Empleos estimados a partir de una encuesta con productores; ⁽³⁾ estimados con base en el uso de mano de obra en 1 ha de pasto mejorado con árboles;

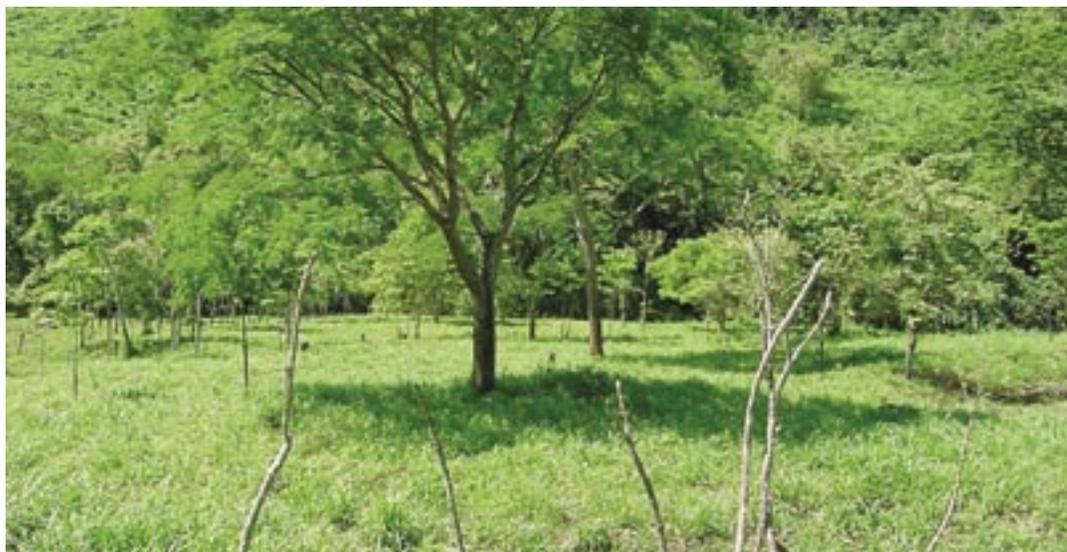
⁽³⁾ estimados con base en el uso de mano de obra en 1 ha de bosque con fines ambientales.

una tasa de descuento de 8%. Estos costos de secuestro de C son muy inferiores a los precios actuales del servicio de secuestro de carbono, los cuales varían entre 11 y 22 US\$ tC⁻¹ (Lecocq 2004). Igualmente, los costos de secuestro de C en Matiguás resultan muy inferiores a los encontrados en otras valoraciones en bosques tropicales (18,3 - 43,5 US\$ tC⁻¹; Segura 1999).

El cambio de uso del suelo de ganadería extensiva a tacotal puede reducir la demanda de mano de obra en un 47%. Por otro lado, un cambio o mejora de los sistemas actuales hacia uno más intensivo con pastos mejorados y árboles (árboles dispersos en potreros, cercas vivas, tacotales, etc.) representa una situación “ganar-ganar” para el finquero y el ambiente global y puede incrementar la demanda de mano de obra en un 74% (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

Los tacotales almacenaron más C que las pasturas en monocultivo o en sistemas silvopastoriles, debido a mayores reservas de C en el mantillo y el suelo. Sin embargo, los tacotales no son una opción competitiva para los agricultores, por los bajos niveles de ingresos que producen y la pérdida de empleos. Como alternativa, se puede elevar el ingreso en un 43% y almacenar 15 t C ha⁻¹ más si se libera el 50% de la finca para tacotales, al mismo tiempo que se convierte el otro 50% en pastos mejorados con árboles (pastoreo y corte). Este cambio permite alcanzar el doble objetivo del modelo de desarrollo limpio: la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible con beneficios significativos para los productores y para la comunidad. El costo de oportunidad de incrementar el secuestro de C en las



Finca Ganadera con árboles en Matiguás, Nicaragua (foto: A. Ruiz)

fincas ganaderas de Matiguás varió entre 3,2 y 26,4 US\$ t C⁻¹. Este sería el costo para los productores de hacer un cambio desde ganadería extensiva (pasto natural o mejorado sin árboles) a un sistema que maximice el secuestro de carbono manejando la cobertura arbórea. Estos costos se encuentran en el rango de precios actuales del servicio ambiental de secuestro de carbono en el mercado internacional.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Albrecht, A; Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3):15-27.
- Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38): 80-87.
- Dixon, J; Carpenter, R; Fallón, L; Sherman, P. 1995. Economic analysis of the environmental impacts of development projects. London, UK, Asian Development Bank. 210 p.
- Fischer, MJ; Rao, IM; Ayarza, MA; Lascano, CE; Saenz, JI; Thomas, JR; Vara, RR. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American Savannas. *Nature* 371:236-238.
- _____; Trujillo, W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. *In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales.* (1999, Turrialba, Costa Rica). Turrialba, CR, FAO - CATIE, SIDE. p.115 -135.
- IPCC. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 881 p.
- López, A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 50 p.
- Lecocq, F. 2004. *State and Trends of the Carbon Market 2004.* World Bank, Carbon Finance Business Team, Washington DC, 31 p.
- MacDicken, K. 1997. *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects.* Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- Mora, V. 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 92 p.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio de almacenamiento y fijación de carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 119 p.
- Szott, L; Ibrahim, M; Beer, J. 2000. The hamburger connection hang-over: cattle, pasture land degradation and alternative land use in Central America. Turrialba, CR, CATIE. 71 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 313).
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2005. Status of ratification of Kyoto Protocol (en línea). Disponible en http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php.
- Walkley, A; Black, CA. 1938. An examination of the Degtajareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.

Avances de Investigación

Pérdida y liberación de nutrimentos durante la descomposición de tres tipos de compost en condiciones de campo¹

Claudia Yaniris Muñoz Astaíza²; Reinhold Muschler³; Jean-Michel Harmand⁴; Gabriela Soto³

Palabras claves: broza de café; liberación de nutrimentos; estabilidad del compost.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la disponibilidad potencial de nutrimentos en compost y lombricompost de broza de café y en un compost elaborado con gallinaza, suelo, carbón vegetal, cascarilla y mucílago de café. Las tasas de descomposición y liberación de N, P, K, Ca y Mg fueron evaluadas durante 209 días, utilizando bolsas de descomposición colocadas bajo las copas de las plantas de café. Durante el compostaje se presentaron pérdidas superiores al 50% de los contenidos iniciales de los nutrimentos. Al final del período inicial de dos meses de compostaje se revelaron diferencias significativas en el grado de descomposición o madurez, siendo el más maduro el lombricompost y el menos maduro el compost de broza. En el campo, el compost de broza perdió más materia que los otros (36%), debido a su menor grado de descomposición; también presentó las mayores tasas de liberación de N (37%), P (61%), K (98%), Ca (22%) y Mg (42%) durante los 209 días. Aunque el compost de residuos tuvo el mayor contenido inicial de P, tuvo menor liberación de este elemento, posiblemente debido a una fijación del P por las arcillas del suelo agregado. La tasa de liberación de K correlacionó positivamente con el contenido inicial.

Nutrient loss and release during the decomposition of three types of compost under field conditions

Key words: Coffee pulp; nutrient release; compost stability.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the potential nutrient availability in coffee-pulp compost, vermicompost, and a compost made from chicken manure, soil, charcoal, and coffee parchment and mucilage (coffee-waste). Decomposition rate and the release of N, P, K, and Mg were evaluated during 209 days using decomposition bags placed under the crowns of coffee plants. During the composting process, more than 50% of the initial nutrient content was lost. At the end of the two-month composting period, composts differed significantly in the degree of decomposition or maturity. Vermicompost was the most mature and coffee-pulp compost the least mature. In the field, coffee-pulp compost lost the most dry matter (36%), because of its lower decomposition rate; it also released the highest amounts of N (37%), P (61%), K (98%), Ca (22%), and Mg (42%) during the 209 days. Although the mixed compost had the highest initial P content, less P was released, probably due to the fixation of P on clay particles added to the mixture. The rate of K release was positively correlated with initial content.

INTRODUCCIÓN

El uso eficiente de materiales orgánicos incorporados al suelo se logra cuando la dinámica de liberación de los nutrimentos coincide con la demanda nutricional por los cultivos. La velocidad de liberación de nutrimentos está en función de la fragmentación, mineralización y humificación, procesos determinantes para la descomposición (Lavelle *et al.* 1993, Zech *et al.* 1997). La descomposición está determinada por la temperatura, la

humedad, las propiedades del suelo, la actividad de la meso- y microfauna (Lavelle *et al.* 1993) y por la calidad de los materiales en descomposición (sobre todo su relación C/N y los contenidos de polifenoles y lignina).

Antes de incorporar materia orgánica al suelo, es común someterla a un proceso de compostaje; p.ej., una descomposición parcial para reducir el volumen y

¹ Basado en Muñoz A, CY. 2002. Disponibilidad de nutrimentos de tres compost. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 67 p.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: claudiayaniris@yahoo.com (autora para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: muschler@catie.ac.cr; gabisoto@catie.ac.cr

⁴ CIRAD-Forêt/CATIE, Sede Central. Correo electrónico: harmand@catie.ac.cr

peso de los materiales y para obtener un producto más estable y con menos patógenos y semillas de malezas, entre otros beneficios (Rink 1992). Sin embargo, se reconoce que durante este proceso hay pérdidas de nutrimentos, principalmente de N. Martins y Dewels (1992) reportaron que se puede perder entre el 16 y el 75% del N total, dependiendo del contenido del N total del material, la temperatura, pH alto (>8) y la frecuencia de volteo.

El objetivo del presente trabajo fue comparar tres tipos de compost de residuos del procesamiento de cerezas de café con respecto a la calidad del producto final, la pérdida de nutrimentos durante el compostaje y la liberación de nutrimentos en condiciones de campo después del compostaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones ambientales y preparación de los compost

El compostaje se realizó en el CATIE (9°52'N, 83°39'O; 622 msnm; 21,8 °C temperatura media anual; 2479 mm de precipitación anual; y 87% de humedad relativa anual). Los ingredientes y el procesamiento de los tres compost se presentan en el Cuadro 1.

La broza (fresca) y el mucílago de café, proveniente del despulpado sin agua, se obtuvieron en noviembre del 2001 del beneficio CoopeSuiza. Solamente la broza para el lombricompost tenía dos meses de reposo. Los demás ingredientes provinieron de fincas cercanas (Muñoz 2002). Las proporciones del compost de residuos y el período de compostaje de dos meses se definieron con el criterio de un agricultor con experiencia en el tema (Edgar Víquez, miembro de la Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba, diciembre del 2001), buscando una aplicabilidad amplia de los resultados.

El compostaje se realizó bajo techo en dos pilas de 45 cm de altura por 2,5 m de largo y 1,5 m de ancho, una

para broza y otra para el compost de residuos (no hubo repeticiones de los tratamientos). En la pila de broza, se colocaron 3800 kg de broza fresca por compostear (87% humedad; 494 kg materia seca) y en la pila de compost de residuos se colocaron 1423 kg de gallinaza, suelo, carbón vegetal, cascarilla y mucílago (55% de humedad; 783 kg materia seca). El volteo se realizó cada tres días, y el control de la humedad se efectuó mediante el tacto, asegurando que no cayeran gotas al presionar un puño de material (Dalzell *et al.* 1991). La cama de broza no se humedeció, ya que su contenido de humedad siempre fue superior al 60%. El compost de broza y el compost de residuos se prepararon durante dos meses. El lombricompost se preparó bajo techo en camas de menos de 20 cm de altura, durante un mes, empleando la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*).



Pila de compost de broza (foto: Claudia Muñoz).

Durante el compostaje se evaluaron la temperatura y la humedad a cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm). Para determinar la humedad, se tomó una muestra compuesta (cuatro submuestras por pila) de los materiales en las cuatro profundidades mencionadas y se secó a 65 °C durante 48 h. Todas las mediciones se realizaron a la misma hora cada tres días durante 60 días. Para evaluar los rendimientos del compostaje

Cuadro 1. Ingredientes y tipo de compostaje de los tres tipos de compost evaluados durante el estudio en CATIE, Turrialba, Costa Rica

Tipo de compost	Ingredientes	Procesamiento
Compost de broza	Broza fresca de café	Volteo cada 3 días
Lombricompost de broza	Broza de dos meses	Lombricompostaje
Compost de residuos	Gallinaza, suelo, carbón vegetal, cascarilla y mucílago de café en relación 1:0,13 : 0,04 : 0,03 : 0,001(peso seco).	Volteo cada 3 días

se pesaron los materiales al inicio y a los 59 días de compostaje.

Caracterización química de los compost

La materia orgánica se analizó por el método de Walkley-Black y carbono orgánico (Nelson y Sommer 1982); el N total por el método semimicro Kjeldahl (Jones y Case 1990); el pH en agua; los nitratos y amonio por extracción con KCl_2 2N y determinación por destilación; el P por colorimetría; y el K, Ca y Mg por absorción atómica (Mills y Jones 1996). La madurez se determinó por medio de las relaciones C/N y NH_4 -N/ NO_3 -N como indicadores (Mathur *et al.* 1993).

Ensayo de liberación

El experimento de liberación se realizó en una parcela de café (*Coffea arabica* cv. Catimor y Caturra) orgánico del CATIE bajo sombra de poró (*Erythrina poeppigiana*) y laurel (*Cordia alliodora*), con las características ambientales dadas arriba, entre marzo y octubre del 2002 (Fig. 1). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con parcelas divididas y cuatro repeticiones, donde las parcelas principales (100 a 180 m²) fueron asignadas a los tipos de compost y las subparcelas a las mediciones en el tiempo (siete bolsas de descomposición). No se empleó un área fija debido a que las filas de cafetos podadas en algunas secciones del cafetal obligaron a ampliar el área de las parcelas para obtener al menos 30 cafetos productivos (edades de entre cinco y ocho años). Se utilizaron bolsas de descomposición de 27 x 17 cm, en las cuales se colocaron 250 g de compost (peso fresco). El tamaño de los orificios de las bolsas fue de 330 μ m para la cara superior y de 40 μ m para la cara inferior (la cara en contacto con el suelo para evitar pérdidas de las fracciones más finas). Las bolsas se cubrieron

totalmente con una malla galvanizada con un tamaño de agujero de 25 mm² para evitar daños por armadillos y se aseguraron al suelo por medio de varillas de hierro, lo cual evitó el volteo y las pérdidas por gravedad.



Bolsa de descomposición en el campo (foto: Claudia Muñoz).

Cada grupo de bolsas (siete) se colocó aleatoriamente debajo de las copas de siete cafetos, orientando el largo de las bolsas en dirección este-oeste. Las evaluaciones se realizaron a los 9, 25, 53, 81, 98, 153 y 209 días. Después de su recolección en el campo, se trasladaron las bolsas al laboratorio para eliminar terrones y pequeñas plantas que crecían sobre el compost, se pesaron, y de cada bolsa se tomó una muestra de 20 g para determinar materia seca. Luego se mezcló el material de las cuatro repeticiones por tratamiento para determinar NH_4 y NO_3 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proceso de compostaje y composición química de los compost

La fase termofílica ocurrió durante los primeros 18 días de compostaje de la broza y hasta los 23 días en el compost de residuos (Fig. 2). Luego de esta fase, la temperatura descendió por debajo de los 40 °C pero sin pérdida de humedad, llevando a la descomposición anaeróbica. Esto posiblemente se debió a la humedad relativa de la zona (87%). Para eliminar el exceso de humedad de la pila, se dió una mayor aireación por medio de volteos diarios durante tres días y se incrementó la temperatura a través de una aplicación de una fuente de azúcares (miel de purga), a razón de 2 L por pila, después de los 23 días de iniciado el compostaje (por única ocasión). Debido a lo anterior, a los 36 días hubo nuevamente un aumento de la temperatura en ambas pilas, estabilizándose en 40 °C en el compost de broza y en 43 °C en el compost de residuos.

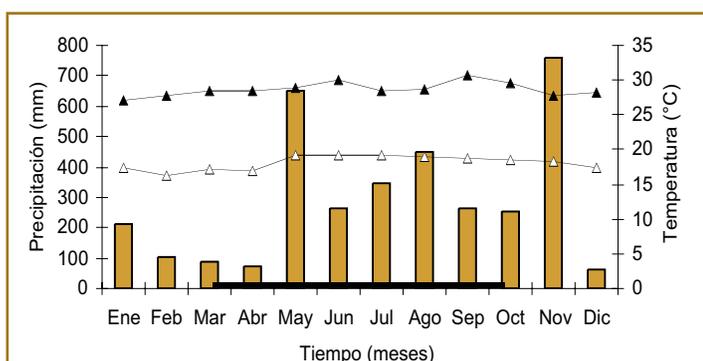


Figura 1. Precipitación mensual (barras) y temperatura máxima (▲) y mínima (Δ) en el CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2002. La barra horizontal indica el período experimental.

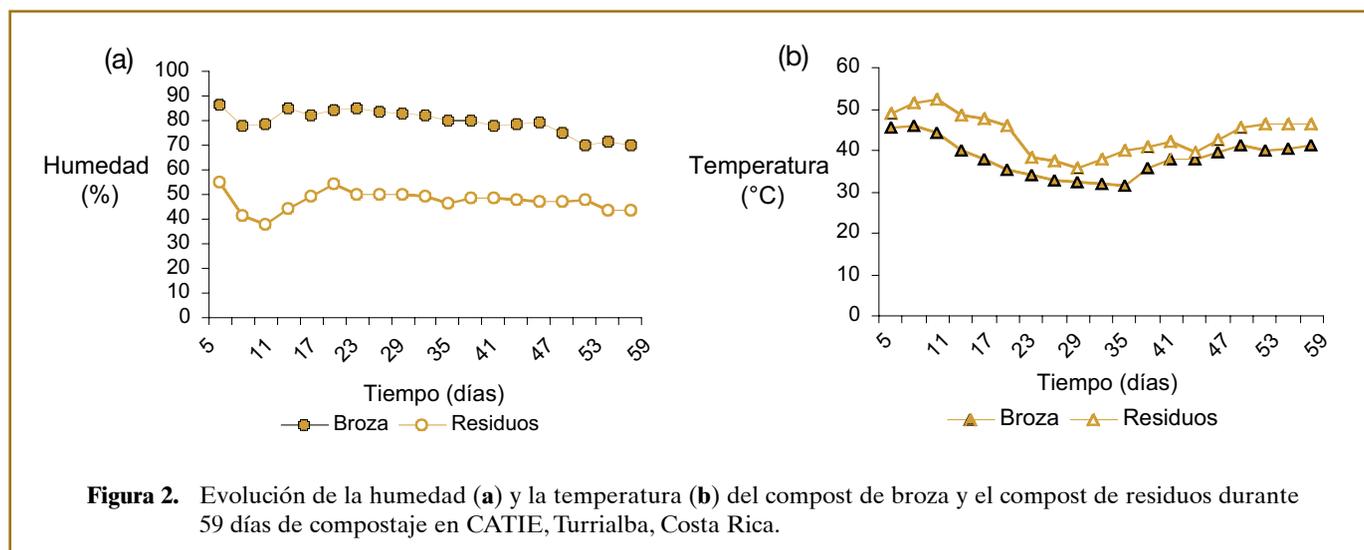


Figura 2. Evolución de la humedad (a) y la temperatura (b) del compost de broza y el compost de residuos durante 59 días de compostaje en CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Los rendimientos fueron de 9,1% para el compostaje de broza y 41,5% para el de residuos en base húmeda, y 21,1 vs. 51,8% en base seca, respectivamente (Fig. 3). Para el compost de broza, los rendimientos de este estudio fueron cercanos a los encontrados por Blandón *et al.* (1998; 8,9 y 16,5% en base húmeda y seca, respectivamente). El menor contenido de humedad del compost de residuos se explica por su composición de materiales más secos. El pH en el compost de broza aumentó en una unidad, probablemente debido al aumento de las concentraciones de las bases (Cuadro 2), mientras que el pH del compost de residuos no cambió.

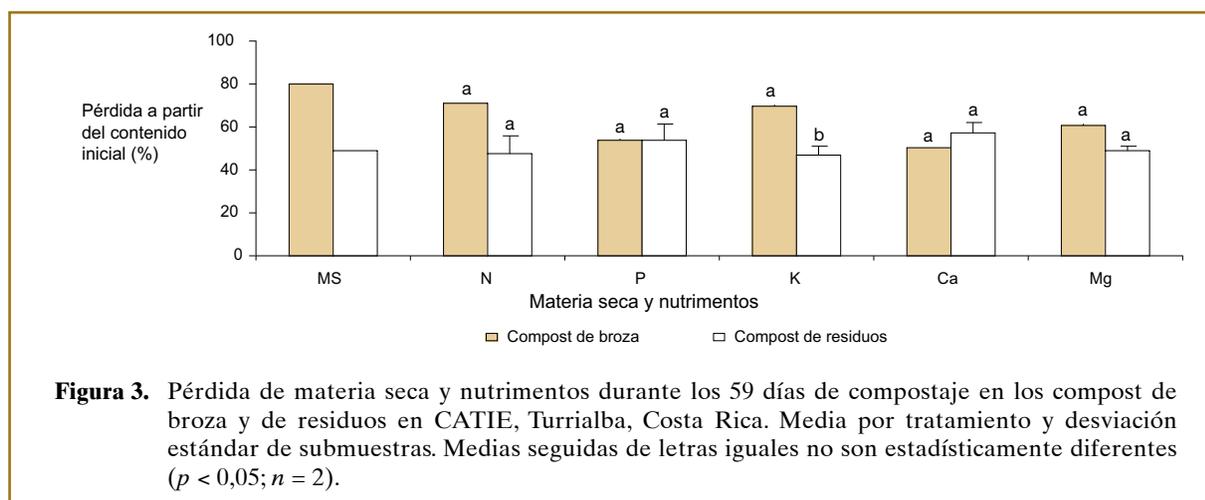
El compost y lombricompost (ambos de broza) difirieron significativamente en todas las variables, excepto C/N, P

(%) y Ca (%). Aparte del efecto de las lombrices, la edad mayor de dos meses de la broza para el lombricompost puede haber contribuido a estas diferencias. En el compost de broza, el contenido de N total fue similar al rango 3,2 a 4,2% reportado en la literatura (Moorthy *et al.* 1995, León-Arteta y Tzitzia 1997, Blandón *et al.* 1998). La concentración de N total en el lombricompost de broza fue menor a la reportada en la literatura, donde varía entre 3,2 y 4,1% (Carrillo *et al.* 1995, Orozco *et al.* 1996, Blandón *et al.* 1999). El porcentaje de N total del compost de residuos fue bajo en comparación con otros compost elaborados a partir de gallinaza (Castellanos y Pratt 1981, Hartz *et al.* 2000), aunque en el presente caso la gallinaza correspondió al 83% en peso seco del total de la mezcla. Para el compost de broza y el

Cuadro 2. Composición química de compost de broza y compost de residuos ($\pm s$) a los 7 y 59 días de compostaje, y composición del lombricompost al final del compostaje en CATIE, Turrialba, Costa Rica

Característica	Compost de broza		Compost de residuos		Lombricompost
	7 días	59 días	7 días	59 días	60 días
Humedad (%)	86,5 +/- 0,0	70,3 +/- 2,0a	51,4 +/- 0,0	43,8 +/- 0,0c	57,0 +/- 0,0b
PH	8,0 +/- 0,9	9,0 +/- 0,0a	8,6 +/- 0,1	8,6 +/- 0,0b	6,4 +/- 0,0c
N total (%)	2,5 +/- 0,2	3,6 +/- 0,0a	1,0 +/- 0,1	1,0 +/- 0,2c	2,5 +/- 0,2b
Amonio (mg/kg)	313,0 +/- 141	32,5 +/- 7,8b	2743 +/- 137	4,0 +/- 3,0b	145 +/- 26a
Nitratos (mg/kg)	14,8 +/- 1,0	1146 +/- 67b	17,3 +/- 6,0	4,2 +/- 1,2c	3033 +/- 35a
C orgánico (%)	43,5 +/- 0,7	37 +/- 0,0a	21 +/- 0,0	16,0 +/- 0,7c	27 +/- 0,0b
C/N	17,8 +/- 0,3	10,4 +/- 0,0b	20,5 +/- 0,0	15,0 +/- 0,7a	10,9 +/- 0,0b
P (%)	0,2 +/- 0,0	0,4 +/- 0,0b	1,1 +/- 0,0	1,0 +/- 0,2a	0,6 +/- 0,0b
K (%)	2,5 +/- 0,1	3,7 +/- 0,1a	1,5 +/- 0,0	1,5 +/- 0,1b	1,1 +/- 0,0c
Ca (%)	0,8 +/- 0,0	2,1 +/- 0,0b	5,2 +/- 0,5	4,3 +/- 0,5a	2,3 +/- 0,1b
Mg (%)	0,2 +/- 0,0	0,4 +/- 0,0b	0,4 +/- 0,0	0,4 +/- 0,0b	0,5 +/- 0,0a

Para el día 59-60 las medias seguidas de letras iguales no son significativamente diferentes (Duncan 1%).



lombricompost, las relaciones C/N y los contenidos de P, K y Mg finales fueron similares y los de Ca superiores a los valores reportados en la literatura (Moorthy *et al.* 1995, Blandón *et al.* 1998, 1999, Irison *et al.* 1999).

En relación con el peso inicial, las pérdidas fueron superiores en el compost de broza (Fig. 3). Los nutrientes de mayor pérdida para el compost de broza fueron N (71%), K (69,7%) y Mg (60,3%) mientras que en el compost de residuos fueron Ca (57%), P (54%) y Mg (49%). Una posible razón de las grandes pérdidas del compost de broza es la alta humedad de este sustrato, la cual superó ampliamente el 60% recomendado (Rink 1992). Este exceso de humedad probablemente condujo a la denitrificación y posterior volatilización del N, además de la lixiviación de nitratos. Las pérdidas de los demás elementos se debieron a la lixiviación. Las pérdidas encontradas en este estudio fueron similares a las reportadas por Blandón *et al.* (1998; 60% N, 66% P, 69% K, 53% Ca y 60% Mg) durante dos meses de compostaje con dos volteos semanales. Contrario a estos resultados, Moorthy *et al.* (1995) hallaron pérdidas muy inferiores de N (27%) y P (0%) después de cuatro meses de compostaje, mientras que el K también sufrió una alta pérdida (73%).

Madurez del compost

Respecto a la madurez, la relación C/N de los tres compost se encontró dentro del rango de 8 a 15 mencionado por Mustin (1987) para el final del compostaje. Asimismo, la relación $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ fue menor a 0,5 para el compost y lombricompost de broza considerado por Brinton (2000) como valor máximo para compost muy maduros. El compost de residuos tuvo una relación $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ cercana a 1.

Patrones de descomposición de los compost en el campo

Descomposición de materia orgánica

La pérdida de materia seca de los tres compost en el campo fue lineal en relación con el tiempo (0,74 para el compost de residuos; 0,3 para el lombricompost; y 0,77 para el compost de broza). Al cabo de los 209 días de evaluación, el lombricompost y el compost de residuos fueron los materiales con menos pérdidas (7 y 13% del peso inicial, respectivamente), mientras que el compost de broza había perdido el 36% (Cuadro 3).

La comparación con las tasas de liberación halladas en otras investigaciones es difícil debido a las diferencias

Cuadro 3. Promedio de materia seca y nutrientes liberados (% del valor inicial) luego de 209 días de descomposición en CATIE, Turrialba, Costa Rica

Materiales	Materia seca y elementos liberados (% del peso inicial)					
	MS	N	P	K	Ca	Mg
Compost de broza	35,9 a	37,1 a	61,1 a	98,1 a	22,1 a	41,7 a
Lombricompost	6,9 b	24,0 b	37,8 b	79,0 c	30,1 a	35,4 a
Compost de residuos	13,3 b	24,3 b	15,4 b	90,7 b	0,0 b	25,3 a

MS: materia seca. Las diferencias entre medias son estadísticamente significativas cuando los promedios están seguidos de letras diferentes ($p < 0,05$; $n = 4$).

en la composición de estos materiales y a la influencia ambiental. Sin embargo, era de esperar que los compost presentaran tasas de descomposición menores que materiales frescos como las hojarasca, debido a que ya habían pasado por una etapa de descomposición. Por ejemplo, en esta misma zona, el estudio realizado por Arco-Verde (1998) mostró que la hojarasca de *Gliricidia sepium*, *Calliandra calothyrsus*, *Canavalia ensiformis* y *Mucuna pruriens* al cabo de 60 días perdió entre el 30 y 50% de su materia seca inicial. El compost de broza a los 53 días es el que se acerca más a estas tasas, ilustrando su menor grado de descomposición y a la vez la mayor madurez del lombricompost.

Los estudios sobre pérdidas de biomasa de compost son escasos. La pérdida de materia seca hallada por Balkcom *et al.* (2001) —de alrededor del 36% para un compost de lodos urbanos al cabo de un año en condiciones de campo, bajo 1270 mm de precipitación anual y 19 °C de temperatura media— fue menor, ya que el compost de broza liberó 36% de su materia seca en tan solo 209 días. Aparte de las diferencias entre los materiales, es posible que esto se deba (al menos parcialmente) a diferencias en las condiciones meteorológicas. En comparación con el lombricompost y el compost de residuos, el compost de lodos urbanos perdió mucha más materia seca, posiblemente debido a una menor madurez, indicada por la amplia relación C/N de 23,1.

Patrones de liberación de nutrientes en el campo

El compost de broza liberó más del 50% de sus contenidos de P y K y menos del 50% de los otros nutrientes en los 209 días de evaluación. El lombricompost liberó menos del 60% del contenido inicial de todos los nutrientes, con excepción del K. El compost de residuos fue el tratamiento con la liberación más lenta, excepto para el K, el cual tiene una liberación rápida de todos los materiales (Cuadro 3).

Durante los primeros 98 días de evaluación, ningún tratamiento liberó cantidades sustanciales de N. El compost de residuos tuvo el comportamiento más irregular, posiblemente debido a su composición heterogénea en comparación con los otros dos. Hasta el día 209 de evaluación, el compost de broza había perdido más de su N inicial (Cuadro 3). Entre los 0 a 53 y 0 a 153 días se hallaron correlaciones negativas significativas entre la relación C/N y las tasas de liberación de N, ilustrando la mayor disponibilidad de N-NO₃ y N-NH₄ para ser liberados con relaciones C/N bajas.

El lombricompost y compost de broza liberaron el P en forma lineal, mientras que la liberación del compost

de residuos no pudo ser descrita por ningún modelo. Al final de los 209 días de evaluación, el compost de broza había perdido el 61%, el lombricompost de broza el 38% y el compost de residuos el 15% de sus contenidos iniciales (Cuadro 3). La tasa de liberación del P tuvo una correlación positiva con el contenido de N inicial, pero negativa con el contenido de P inicial. Lo anterior significa que su liberación dependió fuertemente de la disponibilidad de N para la actividad microbiana. La correlación negativa con el P inicial se explica porque el compost de residuos tuvo los mayores contenidos de P provenientes de la gallinaza, pero su liberación fue la menor, posiblemente causada al fijarse el P con las arcillas del suelo con que se mezcló.

El K tuvo una liberación no lineal. Las pérdidas elevadas de K (Cuadro 3) son comunes debido a su alta solubilidad. Las tasas de liberación del K tuvieron una correlación positiva con el contenido inicial de K. La liberación del Ca fue lineal para el compost y lombricompost de broza; el compost de residuos, debido a sus altas fluctuaciones, no pudo ser descrito por ningún modelo. Este compost no tuvo pérdidas, debido probablemente a una inmovilización del Ca (Cuadro 3). El compost de broza y el lombricompost no difirieron (20-30% liberados), probablemente porque el Ca forma parte de un mismo tipo de material vegetal. El empleo de abonos orgánicos con bajas tasas de liberación, como las encontradas en nuestro estudio, sugiere que en suelos con bajos contenidos de Ca se deben emplear fuentes de liberación rápida, como las minerales. La liberación de Mg fue lineal en el compost y lombricompost de broza. El compost de residuos presentó una tasa de liberación definida solamente a partir de los 98 días de evaluación. La tasa de liberación correlacionó positivamente con el contenido inicial de Mg y N como elemento determinante de la actividad microbiana.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Durante los dos meses de compostaje se presentaron pérdidas de N, P, K, Ca y Mg entre el 49 y el 71% de los contenidos iniciales. Para la mayoría de nutrientes, estos porcentajes fueron superiores a los porcentajes liberados en el campo durante siete meses.
- Las tasas de descomposición durante los 209 días en el campo siguieron el orden: compost de broza > compost de residuos > lombricompost. El menor grado de descomposición del compost de broza explica su mayor pérdida, caso contrario al lombricompost. El menor contenido de N total del compost de residuos explica su menor descomposición.

- Las tasas de liberación de N siguieron el orden: compost de broza > compost de residuos = lombricompost. El contenido inicial de N correlacionó positivamente con la tasa de liberación de N.
- Las tasas de liberación de P siguieron el orden: compost de broza > compost de residuos = lombricompost. Se halló correlación negativa con el contenido inicial de P, lo cual se explica por una posible fijación del P por las arcillas del sustrato en el compost de residuos, el compost con el mayor contenido de P inicial.
- Las tasas de liberación de K siguieron el orden: compost de broza > compost de residuos > lombricompost. El contenido inicial de K correlacionó positivamente con las tasas de liberación.
- Las tasas de liberación de Ca siguieron el orden: lombricompost > compost de broza > compost de residuos.
- Para disminuir la variabilidad en los análisis de compost con composición heterogénea, como el compost de residuos de este estudio, se recomienda usar más repeticiones y analizar cada muestra independientemente.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Arco-Verde, MF. 1998. Tasa de descomposición, disponibilidad de nutrientes y efectos de la aplicación de compuestos orgánicos en el cultivo del maíz en un Humic Andosol de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 105 p.
- Balkcom, KS; Adams, JF; Hartzog, DL; Wood, CW. 2001. Mineralization of composted municipal sludge under field conditions. *Communications Soil Science Plant Analysis* 32 (9/10):1589-1605.
- Blandón, CG; Rodríguez, VN; Dávila, AMT. 1998. Caracterización microbiológica y físico - química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje. *Cenicafé* 49(3): 169-185.
- _____; Dávila, AMT; Rodríguez, NV. 1999. Caracterización microbiológica y físico - química de la pulpa de café sola y con mucílago en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé* 50 (1): 5-23.
- Brinton, WF. 2000. Compost quality standards & guidelines; final report. Estados Unidos, Woods End Research Laboratory, New York State Association of Recyclers. 62 p.
- Carrillo, CM; Gómez, ZJ; Miranda, CJ. 1995. Caracterización de los ácidos húmicos extraídos de cuatro lombricompostos y su efecto sobre la germinación de semillas de maíz *Zea mays* L., algodón, *Gossypium hirsutum* y tomate *Lycopersicon esculentum* L. *Acta Agronómica* 46(1/4):30-36.
- Castellanos, JZ, Pratt, PF. 1981. Mineralization of manure nitrogen- Correlation with laboratory indexes. *Soil Science Society of America Journal* 45: 354-357.
- Dalzell, HW; Biddlestone, AJ; Gray, KR; Thurairajan, K. 1991. Manejo del suelo; producción y uso de composte en ambientes tropicales y subtropicales. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. 178 p.
- Hartz, TK; Mitchell, JP; Giannini, C. 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and compost. *HortScience* 35(2):209-212.
- Irisson, SN; Barois, I; Aranda, EG. 1999. Calidad química, bioquímica y bacteriológica de la vermicomposta de pulpa de café. Simposio Internacional y primera reunión nacional. (1999, Chapingo, MX). *Lombricultura y abonos orgánicos*. Eds. Martínez, C; Romero, R; Corlay L, Trinidad, A y Santoyo, LF. Chapingo, MX. p. 145-147.
- Jones, JB; Case, V. 1990. *Soil testing and plant analysis*. 3 ed. Wisconsin, US. p. 414.
- Lavelle, P; Blanchart, E; Martin, A; Martin, S; Spain, A; Toutain, F; Barois, I; Schaefer, RA. 1993. Hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems; application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25(2):130-150.
- León-Arteta, R; Tzitzia, FO. 1997. Elaboración de composta aeróbica de pulpa de café en Zongolica, Veracruz. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 3(1):55-59.
- Martins, O; Dewels, T. 1992. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology* 42(2):103-111.
- Mathur, SP; Owen, G; Dine, H; Schnitzer, M. 1993. Determination of compost biomaturity. *Biological Agriculture and Horticulture* 10:65-85.
- Mills, HA; Jones, JB. 1996. *Plant Analysis Handbook II*. Georgia, US, Micro Macro Publishing. p. 119.
- Moorthy, VK; Moorthy, AK; Rao, KB. 1995. Studies on composting coffee wastes. *Journal of Coffee Research* 25(2):64-79.
- Muñoz, C. 2002. Disponibilidad de nutrientes de tres compost. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 67 p.
- Mustin, M. 1987. *Le Compost, gestion de la matière organique*. Paris, FR, Editions François Dubusc. 954 p.
- Nelson, DW; Sommer, LE. 1982. Total carbon and organic matter. *In Methods of soil analysis chemical and microbiological properties*. 2 ed. p. 539-594. (Agronomy Series no. 9).
- Orozco, FH; Cegarra, J; Trijillo, LM; Roig, A. 1996. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia foetida*: effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Biology and Fertility of Soils* 22:162-166.
- Rink, R. 1992. *On-farm composting handbook*. New York, US, Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 186 p.
- Zech, W; Senesi, N; Guggenberger, G; Kaiser, K; Lehmann, J; Miano, TM; Miltner, A; Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79:117-161.

Avances de Investigación

Relaciones entre la cobertura arbórea en potreros y la producción bovina en fincas ganaderas en el trópico seco en Cañas, Costa Rica¹

Claudia Restrepo-Sáenz²; Muhammad Ibrahim³; Celia Harvey³; Jean Michel Harmand³; Jorge Morales⁴

Palabras claves: árboles dispersos en potreros; cambio de peso vivo; selectividad de forraje; sistemas de producción.

RESUMEN

Se determinó, con entrevistas e imágenes de satélite, la relación entre la cobertura arbórea en potreros y el manejo y la producción animal en 53 fincas ganaderas de la zona seca del Pacífico de Costa Rica. También durante la época seca (febrero-mayo) y lluviosa (junio-agosto), en una finca con potreros con cobertura alta (27%), media (14%) y baja (7%) de árboles, se evaluaron los cambios de peso en novillas brahmán, la selectividad de especies forrajeras y la calidad de la dieta. El 60% de las fincas se dedica a la producción de ganado de carne, el 20% es de doble propósito y el 20% restante se destina a la producción de carne y la agricultura en forma mixta. El 90% de las fincas tiene árboles dispersos en potreros y cercas vivas. La cobertura arbórea en potreros es en promedio del 16% (0-60%), y está correlacionada positivamente con la frecuencia del control de malezas, la cantidad de mano de obra familiar, el período de descanso de los potreros, los años de experiencia en la finca y la realización de otras actividades productivas del propietario, pero negativamente con el área del bosque en la finca y la carga animal. En la época lluviosa, el mayor crecimiento animal ocurrió bajo la cobertura alta (893 g animal⁻¹ día⁻¹), superior en 13-14% a la cobertura media y baja, determinado por la mayor selección de *Brachiaria brizantha* y la calidad nutricional superior del pasto (DIVMS > 60%) bajo la cobertura alta. Durante la época seca, las novillas bajo cobertura alta perdieron menos peso (93 g animal⁻¹ día⁻¹) que los animales bajo cobertura media (160 g día⁻¹), pero fueron similares a los animales bajo cobertura baja (104 g día⁻¹).

Relationships between tree cover in pastures and cattle productivity in livestock farms in the dry Tropics, Cañas, Costa Rica

Key words: Trees in pastures; changes in live weight; forage selectivity; production systems.

ABSTRACT

Using interviews and satellite images, the relationship between tree cover in pastures and animal management and productivity was studied in 53 farms in the dry zone of the Pacific Coast of Costa Rica. Additionally, the effect of high (27% of the area), medium (14%) and low (7%) tree cover in pastures on animal performance of Brahman heifers was studied on one farm. Growth rate, species selection and diet quality were evaluated during both dry (February–May) and rainy (June–August) seasons. Sixty percent of the farms produced beef only, 20% were dual-purpose and 20% a mix of beef production with crop systems. Ninety percent of farms retain dispersed trees in the grazing areas and in living fences. Tree cover was 16% (range of 0 to 60%) and was associated positively with the frequency of weed control, resting period of pastures, availability of family labor, years of farmer's experience on the study farm and the existence of off-farm economic activities, but negatively with the area of natural forest and the animal stocking rate. Heifers grazing paddocks with high tree cover had a growth rate of 893 g animal⁻¹ day⁻¹ during the rainy season, 13-14% higher than under medium or low cover. This was associated with a greater selectivity of *Brachiaria brizantha* and higher nutritional quality (>60% digestibility) under high tree cover. During the dry season, heifers under high tree cover lost less weight (93 g animal⁻¹ day⁻¹) than those under the medium cover (160 g animal⁻¹ day⁻¹) but losses were similar to those under low cover (104 g animal⁻¹ day⁻¹).

¹ Basado en Restrepo, C. 2002. Relaciones entre la cobertura arbórea en potreros y la producción bovina en fincas ganaderas en el trópico seco, Cañas, Costa Rica. Tesis M.Sc., Turrialba, Costa Rica, CATIE.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2002. Correo electrónico: claires@yahoo.com (autora para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: mibrahim@catie.ac.cr; charvey@catie.ac.cr; harmand@cirad.fr

⁴ Ministerio de Agricultura. Cañas, Guanacaste, Costa Rica. Correo electrónico: jmorales@racsa.co.cr

INTRODUCCIÓN

En los países tropicales, la producción bovina se basa en el pastoreo como principal recurso alimenticio. Durante los últimos 40 años, el área de pasturas en Centroamérica ha aumentado de 3,5 a 9,5 millones de ha, y el inventario bovino ha pasado de 4,2 a 9,6 millones de cabezas (Kaimowitz 2001). Esta expansión ha llevado a la pérdida y fragmentación de bosques y a la creación de paisajes que constituyen mosaicos de potreros, bosques y cultivos. Sin embargo, se ha demostrado que algunos cambios en la rentabilidad del sistema de producción ganadera pueden disminuir la presión sobre los bosques (Kaimowitz 2001).

La presencia de árboles en los potreros cumple un papel importante en el incremento de la rentabilidad de las fincas ganaderas, al ofrecer beneficios económicos adicionales como madera, postes y suplementos de alta calidad nutricional, como forrajes y frutos (Camero *et al.* 2001, Navas *et al.* 2001), además de la capacidad del sistema para recibir pagos por servicios ambientales. Igualmente, tienen un alto potencial para mejorar la producción animal, gracias al aporte de condiciones mejoradas para el bienestar de los animales (Souza de Abreu 2002). Además, desde el punto de vista ecológico, estos sistemas contribuyen positivamente al disminuir la degradación de las pasturas (Szott *et al.* 2000) y la compactación de los suelos (Belsky 1994). También favorecen la conservación de la biodiversidad, facilitan la regeneración natural de los árboles (Ibrahim y Camargo 2001) y ayudan a conectar parches de bosques (Harvey y Haber 1999).

A pesar de que existe información sobre la distribución y presencia de árboles en potreros, se desconocen sus relaciones con las características biofísicas y socioeconómicas de las fincas y con las respuestas de la producción animal; por ello, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la cobertura arbórea en potreros sobre el manejo y la producción animal en fincas ganaderas en Cañas, Guanacaste, Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en un área de 10000 ha (10°25'N - 85°06'O), entre los municipios de Cañas, Higuerón y Abangares, provincia de Guanacaste, Pacífico Norte de Costa Rica, en la zona de trabajo del Proyecto Fragment⁵. La altitud de la zona varía entre 80 y 250 m,

con una temperatura media de 27,6 °C, precipitación media anual de 1544 mm, época lluviosa entre mayo y octubre (donde cae cerca del 88% de las lluvias) y 22-82% de humedad relativa durante el año. Los suelos predominantes son molisoles y la zona de vida es Bosque Seco Tropical (Holdridge 1978).

Se caracterizaron 53 fincas escogidas al azar (23% de las fincas mapeadas). Se hicieron entrevistas directas a los finqueros y análisis de mapas e imágenes de satélite del año 2000 para estimar el porcentaje de cobertura arbórea (porcentaje del área de los potreros cubierta por las copas de los árboles dispersos en ellos), y para recopilar las siguientes características de cada finca: uso del suelo (tamaño de parcelas y distribución de diferentes usos); características de los productores (edad, educación, mano de obra); características de los sistemas ganaderos (tamaño y estructura del hato, razas, pastos), e identificación de las especies arbóreas dispersas en potreros y cercas vivas y su uso.

Posteriormente, se clasificaron las fincas de la zona por sistema de producción bovina —carne, doble propósito y mixto (ganadería y agricultura)— y se evaluaron las relaciones entre cobertura arbórea y las características de las fincas y los productores. Para comparar los sistemas de producción, se realizaron pruebas de normalidad, análisis de varianza, pruebas de χ^2 y análisis de correlación lineal entre las variables. Para relacionar la cobertura arbórea y las características de las fincas, se realizaron regresiones múltiples *stepwise* y análisis de colinealidad entre las variables.

Para analizar más detalladamente las relaciones entre cobertura de árboles en potreros y producción animal, se seleccionó una finca (Hacienda La Montaña) dentro del área de estudio del proyecto Fragment, con base en la cobertura arbórea estimada de las imágenes de satélite, la presencia de diferentes niveles de cobertura arbórea en la finca, el sistema de producción de carne, la presencia de potreros con árboles y pastos mejorados y el manejo zootécnico de los animales. En esta finca, se seleccionaron tres potreros típicos de la zona (pastos *Brachiaria brizantha* e *Hyparrhenia rufa*), con cobertura arbórea alta (27%), media (14%) y baja (7%). En cada potrero se mantuvieron siete novillas brahmán (con un promedio de 219 ± 32 kg cada una), bajo pastoreo continuo, manteniendo así una carga animal representativa

⁵ “Desarrollo de Modelos y Métodos para la Evaluación del Impacto de los Árboles en la Productividad de Fincas y la Biodiversidad Regional en Paisajes Fragmentados”. Proyecto financiado por la Comisión Europea, Programa del Quinto Esquema de la Comunidad Europea, “*Confirming the International Role of Community Research*”, INCO-DEV Contract ICA4-CT-2001-10099.

de la finca de 0,6 UA ha⁻¹ en sequía y de 0,9 UA ha⁻¹ en época de lluvias (1 UA = unidad animal equivalente a 400 kg de peso vivo). Los potreros seleccionados midieron 8,4 ha en promedio.

Para determinar el efecto de las coberturas arbóreas sobre la producción animal, se utilizó un diseño de parcelas divididas con cuatro réplicas (cuatro novillas), donde la parcela grande fue la época —lluviosa y seca— y la subparcela fue la cobertura —alta, media y baja—. El estudio se llevó a cabo en las épocas seca (febrero, marzo y abril) y lluviosa (mayo, junio y julio) del 2002. En cada época, hubo un período inicial de adaptación de los animales, de un mes, y otro de dos meses para toma de datos. Las variables medidas fueron el cambio de peso de las novillas (al inicio de la evaluación y mensualmente); la selectividad de especies forrajeras por los animales (observación directa de las novillas); la composición botánica y disponibilidad de materia seca de las pasturas; y la calidad nutricional de las pasturas. La composición botánica y disponibilidad de materia seca se midió con el método Botanal (Mannetje y Haydock 1963), tomando 60 muestras en cada potrero, tanto en la época lluviosa como en la seca. Para determinar la calidad del pasto, se recolectaron tres muestras por potrero en cada época, simulando el pastoreo. Las variables de calidad fueron proteína cruda (PC); digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS); fibra ácido detergente (FAD), y fibra neutro detergente (FND).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las fincas

Los sistemas de producción de las fincas de la zona fueron: carne (60% de las fincas), doble propósito (20%) y mixtas (carne y agricultura, 20%). El tamaño promedio de las fincas fue de 160 ha. Las fincas mixtas fueron en promedio tres veces más grandes que las de carne y 10 veces mayores que las de doble propósito (Cuadro 1), y dedicaron el 25% del área a cultivos (*Saccharum*

officinarum, *Cucumis melo* y *Citrullus lanatus*, entre otros). En promedio, la carga animal fue de 1,3 (entre 0,2 y 4,7) UA ha⁻¹, muy superior a la carga media de Guanacaste, de 0,7 UA ha⁻¹ (CORFOGA-MAG 2000). El área dedicada a potreros varió entre el 14 y 100% del área total de la finca. El 94% de las fincas utilizó pastoreo rotacional, con un período de ocupación de cuatro a 90 días y un período de descanso de ocho días a cinco meses, los cuales variaron con la época del año. El tamaño medio de los potreros varió entre 0,6 y 40 ha, principalmente con pasturas de *B. brizantha* e *H. rufa*.

Las fincas de producción de carne en la zona fueron de tamaño mediano, con un nivel medio de tecnificación; es decir, uso de inseminación artificial, presencia de pastos mejorados y mayor número de potreros, lo que aseguró una mejor rotación en la finca. La mayoría de los animales fueron de razas cebuinas (>60% hato), principalmente brahmán. Se vendieron los novillos gordos (>300 kg), generalmente a los mataderos cercanos. Las fincas de doble propósito fueron relativamente pequeñas, y la familia propietaria trabajaba en la finca. En estas fincas, existió una considerable presencia de razas europeas y animales criollos (>40% hato). Generalmente, los terneros se vendieron recién destetados, tuvieron un número reducido de potreros y un bajo uso de insumos externos. Estos sistemas de producción ganadera son más sostenibles en términos económicos y técnicos (Montenegro y Abarca 2001, Souza de Abreu 2002). Las fincas mixtas, por el contrario, fueron de mayor tamaño, y la ganadería fue un aporte a la producción total de la finca. En estas, el componente pecuario fue manejado en una forma más tecnificada e intensiva, lo cual se reflejó en el uso de prácticas como un sistema de pastoreo rotacional, alta carga animal, uso de pasturas mejoradas, técnicas de conservación de forrajes para la época seca (henificación), inseminación artificial y programas de mejoramiento genético del hato con razas europeas de carne (>20% del hato).

Cuadro 1. Características de las fincas ganaderas según su sistema de producción, área promedio y área en potreros y bosques, expresadas como porcentaje del área total de la finca, Cañas, Guanacaste, Costa Rica

Sistema de producción	Fincas encuestadas (%)	Área total (ha)	Área en potreros (% del área total)	Área en bosques (% del área total)
Carne	56,6 (30) ⁽²⁾	118 ± 157 b ⁽³⁾	86 ± 20 ab	10,0 ± 15,3 a
Doble propósito	22,6 (12)	34 ± 64 b	90 ± 11 a	1,6 ± 3,4 a
Mixto	20,7 (11)	383 ± 557 a	58 ± 26 b	9,0 ± 10,0 a

⁽²⁾ Entre paréntesis el número total de fincas.

⁽³⁾ Medias en la misma columna seguidas por la misma letra no son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$); desviación estándar después del signo ±.

Características de los propietarios de las fincas

La mayoría de los productores entrevistados (84%) había realizado por lo menos estudios de primaria (34% habían asistido a la universidad, 3% poseían estudios técnicos y 9% de secundaria). Los finqueros de los sistemas de producción de carne y mixtos tuvieron, en promedio, un nivel de escolaridad superior (entre secundaria, formación técnica, y universitaria) que los finqueros de doble propósito (primaria; $p < 0,05$). La mitad de los encuestados tuvo acceso a información técnica periódica (53%), como revistas y programas de televisión, y 37% había asistido a cursos de capacitación.

Cerca del 60% de las fincas fueron la fuente principal de ingresos para sus familias propietarias; en el resto, los propietarios se dedicaron a otra actividad económica simultánea. Las fincas de doble propósito fueron más intensivas en uso de mano de obra familiar (0,15 personas ha⁻¹; $p < 0,05$) que las fincas de carne (0,04), y similares a las de producción mixta (0,10), probablemente debido a la mayor diversidad y requerimientos de labores, y también porque aproximadamente la mitad de los propietarios de las fincas de doble propósito y mixtas vive en ellas, pero en el caso de fincas de carne solamente el 23% de los dueños las habitan.

Presencia de árboles en potreros

En el 96% de las fincas, se dejaron árboles dispersos en potreros (100% en las fincas de carne y mixtas; 82% en las fincas de doble propósito; $p < 0,02$). Los productores reportaron 64 especies de árboles en potreros, siendo las más frecuentes guácimo (*Guazuma ulmifolia*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), cenízaro (*Samanea saman*) y laurel (*Cordia alliodora*). Según los produc-

tores, resaltó el uso para madera (50%; *E. cyclocarpum*, *S. saman*, *C. alliodora*); sombra (39%; *G. ulmifolia*, *E. cyclocarpum*, *Ficus* spp.); postes muertos (34%; *Maclura tinctoria*, *C. alliodora*, *Gliricidia sepium*); frutales para humanos (33%; *Mangifera indica*, *Citrus sinensis*, *Persea americana*); leña (28%; *G. ulmifolia*, *Byrsonima crassifolia*); frutos para ganado (25%; *G. ulmifolia*, *E. cyclocarpum*, *S. saman*); forrajeras (22%; *G. ulmifolia*), y alimentos para animales silvestres (11%; *Anacardium excelsium*, *M. indica*). El aporte de frutos arbóreos desempeñó un papel muy importante en la ganadería de la zona, puesto que estos fructificaron en la sequía (época de menor oferta de forrajes) y sirvieron como alimento de alta calidad nutricional para el ganado (elevado contenido de azúcares y proteína). Además, tuvieron efectos positivos en el consumo voluntario y en el balance de nutrientes en el nivel ruminal (Navas *et al.* 2001).

El 87% de las fincas en Cañas tuvieron cercas vivas, compuestas principalmente por árboles de jiñote (*Bursera simaruba*), pochote (*Pachira quinata*), roble sabana (*Tabebuia rosea*) y jocote (*Spondias purpurea*). En el 62% de las fincas se podaron los árboles de *B. simaruba* y *P. quinata* por lo menos una vez cada dos años, a una altura de 2 m, para conseguir estacas para reparar las cercas. En las fincas de carne y doble propósito, las cercas se podaron con mayor frecuencia que en las fincas mixtas, lo que reflejó un manejo constante de los árboles.

Cobertura de árboles en potreros

La cobertura media de árboles en potreros fue del 16% (Fig. 1; entre 0 y 60%), y un alto porcentaje de los potreros (70%) tuvo menos del 20% de cobertura arbórea. Aunque no se presentaron diferencias entre los sistemas

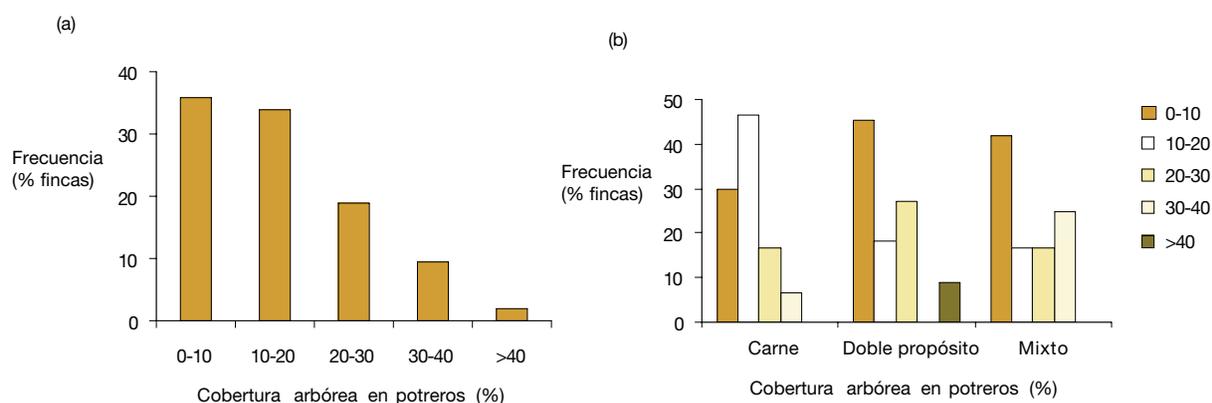


Figura 1. Porcentaje de fincas entrevistadas ($n = 53$) en cada rango de cobertura arbórea en potreros, considerando todas las fincas (a) y en cada sistema de producción (b) en Cañas, Guanacaste, Costa Rica.

Cuadro 2. Coeficientes de regresión (*b*) para las variables que afectan la cobertura arbórea en potreros en todas las fincas encuestadas (*n* = 53) en Cañas, Guanacaste, Costa Rica

Variable	<i>b</i>	<i>p</i> < <i>F</i>
Mano de obra familiar (jornales ha ⁻¹)	92,47	0,0001
Realización de otras actividades productivas (sí/no)	11,34	0,0001
Frecuencia control de malezas (meses año ⁻¹)	15,75	0,0001
Período de descanso de potreros (días)	0,14	0,02
Años de propiedad de la finca	0,20	0,02
Área de bosque en la finca (%)	- 0,31	0,03
Carga animal (UA ha ⁻¹)	- 3,93	0,03

1 UA = 400 kg de peso vivo.

de producción, la variación en un sistema dado fue muy alta. Únicamente en las fincas de doble propósito se observaron coberturas superiores al 40%, lo cual está muy relacionado con la existencia de una alta proporción de bovinos de razas europeas (*Bos taurus*), puros o cruzados, con una menor resistencia a la radiación solar y una mayor necesidad de áreas con sombra para controlar el estrés calórico (Mitlöhner *et al.* 2001).

Por otro lado, el porcentaje de cobertura de árboles en potreros estuvo relacionado positivamente con la frecuencia del control de malezas, la cantidad de mano de obra familiar y el período de descanso de los potreros, los años de experiencia en la finca y la realización de otras actividades productivas del propietario, pero negativamente con el porcentaje del área de bosque en la finca y la carga animal (Cuadro 2).

En trabajos realizados en la zona subhúmeda en Costa Rica, se encontró que los controles selectivos de malezas estimulan la regeneración de árboles en potreros (Camargo *et al.* 2000), en parte porque se elimina parte de la vegetación cercana a las plántulas, disminuyendo la competencia con las malezas (Barrios *et al.* 1999). Por otro lado, un mayor período de descanso de los potreros tuvo un efecto positivo en la cobertura de árboles, probablemente debido a que los animales hicieron menos daños (Camargo *et al.* 2000).

La presencia de plántulas de *C. alliodora* en potreros tuvo una relación inversa con la dependencia económica de la finca (principal fuente de ingresos de la familia; Camargo *et al.* 2000), lo cual sugiere una menor

regeneración de árboles y una posterior presencia de pocos árboles dentro de los potreros de los agricultores que tienen menos fuentes alternativas de ingreso. Esta relación fue similar y muy significativa en las fincas de doble propósito ($r = 32,55$; $p < 0,001$), donde la realización de otras actividades productivas (menos dependencia económica de la finca) fue asociada con una mayor cobertura arbórea. Posiblemente, en las fincas habitadas por la familia propietaria existió un mayor sentido de la conservación de los árboles (Scherr y Current 1997) y una mayor cultura agrícola, y se pudo dedicar más tiempo a las actividades agroforestales (Cipagauta *et al.* 1999).

El porcentaje de la finca con bosque secundario tuvo una relación negativa con el porcentaje de la cobertura de árboles en potreros, lo cual sugirió que los finqueros pretendieron conservar los árboles en los bosques y aprovecharon los presentes en los potreros como fuente de madera, leña y postes (Fisher y Bunch 1996). Generalmente, en Costa Rica los finqueros dejan parches de bosques en sus fincas para proteger las nacientes de agua, como fuente de productos arbóreos para su uso en la finca (principalmente madera y postes) o para la venta de madera o leña (Schelhas 1996). En Cañas, el 50% de las fincas encuestadas presentaron áreas de bosques secundarios y bosquetes que cubrieron, en promedio, el 7% del área de la finca (1,4-27%). La alta carga animal se relacionó con mayores daños en los brinzales y latizales de árboles dispersos en potreros (Camargo *et al.* 2000). Los daños a los árboles por el ramoneo de los animales pueden ser mitigados al suplementar los animales; la poca disponibilidad de forraje aumenta di-

chos daños, y la presencia de animales más livianos en sistemas ganaderos como la cría los reduce (Ibrahim y Camargo 2001).

Producción de forraje

Durante la época seca (febrero-abril), se observó una mayor producción de materia seca (MS) de pastos en los potreros con cobertura arbórea alta y media, lo cual se podría atribuir a una mayor humedad en el suelo y, consecuentemente, a una mayor tasa de crecimiento de los pastos (Belsky 1994, Ludwig *et al.* 2001). La producción de MS en los potreros con cobertura arbórea baja mostró un incremento en los meses lluviosos (junio-agosto).

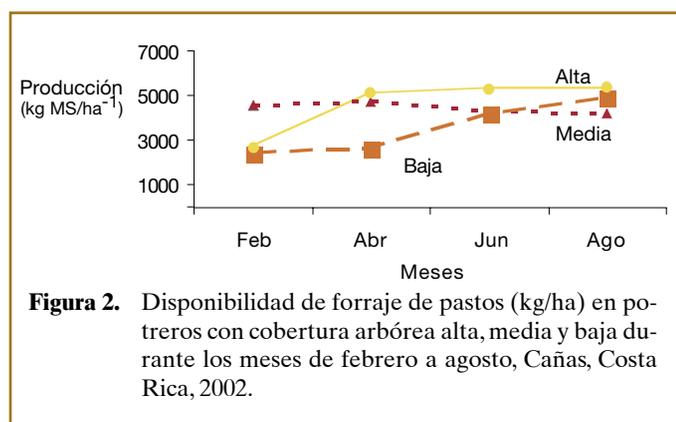


Figura 2. Disponibilidad de forraje de pastos (kg/ha) en potreros con cobertura arbórea alta, media y baja durante los meses de febrero a agosto, Cañas, Costa Rica, 2002.

Las principales especies forrajeras de gramíneas y leguminosas encontradas en los potreros fueron brachiaria (*B. brizantha*), jaraguá (*H. rufa*), grama (*Paspalum notatum*), zacate mechudo (*Rottboellia cochinchinensis*) y kudzú (*Pueraria phaseoloides*). La mayoría del forraje en los potreros de cobertura baja y alta correspondió a *B. brizantha* e *H. rufa*, mientras que en la cobertura media correspondió a *H. rufa*. Durante la época seca, la mayor cantidad de MS en la cobertura alta fue de *H. rufa*, pero con las lluvias fue reemplazada por *B. brizantha* y *P. notatum*. En la cobertura media, la mayor proporción de pasto fue de *H. rufa* durante todo el experimento, pero se observó un incremento de la proporción de *R. cochinchinensis* y *P. notatum* al inicio de las lluvias.

Calidad de la dieta

La digestibilidad de la dieta fue superior en todos los potreros durante la época lluviosa (42 en sequía vs. 60% en lluvias). Además, fue ligeramente mayor bajo la cobertura alta durante las lluvias (62 vs. 57% en media y baja cobertura), mientras que no hubo diferencias en la época seca. El contenido de proteína cruda fue superior

en la época lluviosa en todos los potreros (3,5 en sequía vs. 9,5% en lluvias). Se observó un valor superior bajo la cobertura media durante las lluvias (10,6 vs. 8,8 en alta y 9,1% en baja) y durante la época seca (4% en la cobertura alta y media vs. 2,6% en la baja), probablemente por la mayor proporción de leguminosas. Las variaciones en la calidad nutricional de los pastos, característicos del Pacífico de Centroamérica (Holmann y Estrada 1997), probablemente determinaron los resultados en los cambios de peso en las novillas.

Selectividad de especies consumidas bajo diferentes coberturas arbóreas

En todos los potreros, las novillas seleccionaron principalmente gramíneas durante las épocas seca y lluviosa; la única diferencia estacional fue la selección de frutos durante la época seca. Las especies de pastos y arbóreas seleccionadas en cada potrero variaron según la época del año ($p < 0,01$) y la cobertura de los potreros ($p < 0,0001$; Fig. 3). En la época seca, las novillas de los potreros con coberturas alta y media seleccionaron un mayor número de especies que en la baja ($p < 0,01$); en la época lluviosa, las novillas del potrero con cobertura media fueron las que seleccionaron el mayor número de especies, seguidas por las de cobertura baja y alta, sucesivamente ($p < 0,0001$). Además, en la época lluviosa las novillas (especialmente las del potrero de cobertura media) seleccionaron hasta un 20% de leguminosas herbáceas (promedio de 19% PC y 54% DIVMS), mientras que, en la época seca, seleccionaron frutos de *S. saman*, *E. cyclocarpum* y *G. ulmifolia* (11-16% PC; 67-74% DIVMS).

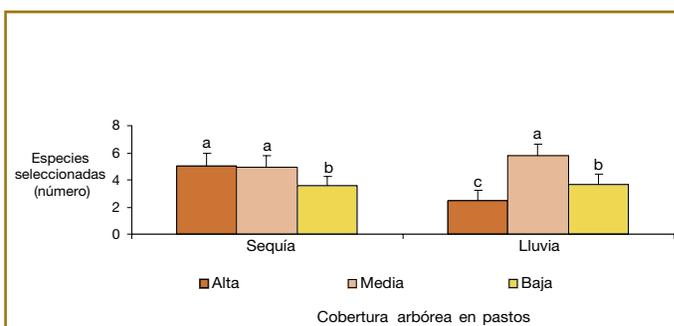


Figura 3. Número de especies de pastos y árboles seleccionadas en potreros con cobertura arbórea alta, media y baja, durante las épocas seca y lluviosa en Cañas, Guanacaste, Costa Rica (medias con la misma letra en la misma época no presentan diferencias significativas; $p < 0,05$).



Finca ganadera típica del trópico seco de Costa Rica (Cañas, Guanacaste) con árboles dispersos en potreros y cercas vivas (foto: C. Restrepo).

Efectos de la cobertura de árboles en potreros sobre los cambios en el peso vivo

La presencia de árboles en potreros ha mostrado efectos positivos en el consumo de alimentos, la producción de leche y la tasa de crecimiento (McDaniel y Roark 1956, Souza de Abreu 2002). Los aumentos de peso encontrados en el presente experimento en la época lluviosa (700-890 g día⁻¹) fueron superiores a los hallados en pasturas tropicales manejadas tradicionalmente, donde varían entre 300 y 500 g día⁻¹ en Costa Rica (CORFOGA-MAG 2000). Este resultado puede deberse a la baja carga manejada dentro del experimento (0,65-0,9 UA ha⁻¹), que permitió una selección de los pastos de mejor calidad. En la época lluviosa, se encontraron valores superiores en potreros con cobertura alta de árboles (893 g animal⁻¹ día⁻¹), un 13-14% mayor que los animales en cobertura media ($p < 0,01$) y cobertura baja ($p < 0,05$; Fig. 4). Durante la época seca, las novillas bajo cobertura alta perdieron menos peso (93 g animal⁻¹ día⁻¹) que los animales bajo cobertura media (160 g día⁻¹), pero fueron similares a los animales en cobertura baja (104 g día⁻¹). Estos resultados positivos estuvieron influenciados por la mayor presencia de pasto *B. brizantha* —especie tolerante a la sombra (Carvalho 1997)— en el potrero con cobertura alta (entre 20 y 50% bajo la cobertura alta y un máximo del 30% MS bajo las coberturas baja y media). Estos cambios se relacionaron también con la calidad superior del pasto en esta cobertura en la época lluviosa, y sugieren que resulta indispensable el manejo de pasturas adecuadas para mantener coberturas altas de árboles dentro de los potreros.

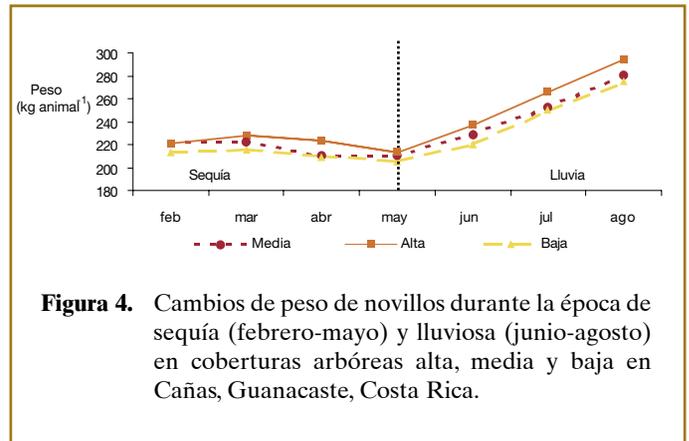


Figura 4. Cambios de peso de novillos durante la época de sequía (febrero-mayo) y lluviosa (junio-agosto) en coberturas arbóreas alta, media y baja en Cañas, Guanacaste, Costa Rica.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio, los productores reportan un alto número de especies arbóreas en los potreros, pero en el nivel de finca son pocas las especies dominantes. Esto implica que algunas son especies vulnerables y requieren de acciones inmediatas para su restauración y conservación. La mayoría de fincas (> 70%) presentaron potreros con cobertura arbórea menor al 20%; en este sentido, las fincas con sistema de producción doble propósito mostraron una tendencia a tener mayor cobertura arbórea (> 20%). Esto ofrece una oportunidad para incentivar el incremento de cobertura de árboles en los potreros para diversificar las fincas y, por ende, mejorar el bienestar de las familias rurales.

En la época seca, los potreros con cobertura arbórea alta y media mostraron una mayor producción de materia seca de los pastos; además, ofrecieron una dieta con mayor diversidad de especies. Esto refleja la importancia de los árboles en la conservación de la humedad del suelo y como fuente alterna de alimento en época de escasez. Durante la época lluviosa, las novillas manejadas en potreros con alta cobertura arbórea mostraron una ganancia de peso 13 y 14% superior que aquellas localizadas en potreros con media y baja cobertura arbórea, respectivamente. Esto se atribuye al efecto de los árboles sobre la mitigación del estrés calórico, producción y calidad del pasto consumido por los animales.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Barrios, C; Beer, J; Ibrahim, M. 1999. Pastoreo regulado y bostas del ganado para la protección de plántulas de *Pithecellobium saman* en potreros. *Agroforestería en las Américas* 6(23):63-65.
- Belsky, AJ. 1994. Influences of trees on savanna productivity: test of shade, nutrients and tree grass competition. *Ecology* 75: 922-932.
- Camargo, C; Ibrahim, M; Somarriba, E; Finegan, B; Current, D. 2000. Factores ecológicos y socioeconómicos que influyen en la regeneración natural de laurel (*Cordia alliodora*) en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo y sub-húmedo de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 7(26): 46-52.
- Camero, A; Ibrahim, M; Kass, M. 2001. Improving rumen fermentation and milk production with legume-tree fodder in the Tropics. *Agroforestry Systems* 51:157-166.
- Carvalho, MM. 1997. Asociaciones de pasturas con árboles en la región centro sur del Brasil. *Agroforestería en las Américas* 15(4): 5-8.
- Cipagauta, M; Velásquez, JE; Gómez, JE. 1999. Estrategias de implementación y experiencias agrosilvopastoriles con pequeños productores en el Piedemonte Amazónico Colombiano. *In Seminario Internacional sobre Sistemas Agropecuarios Sostenibles* (6, 1999, Cali, CO). Memorias. p. 7-8.
- CORFOGA (Corporación Ganadera, CR); MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 2000. Censo Ganadero (en línea). Costa Rica. Consultada en septiembre del 2002.
- Fisher, L; Bunch, R. 1996. Challenges in promoting forest patches in rural development efforts. *In Shelhas, J; Greenberg, R.* eds. *Forest Patches in Tropical Landscapes*. Washington, US, Island Press. p. 381-400.
- Harvey, C; Haber, WA. 1999. Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. *Agroforestry Systems* 44: 37-68.
- Holdridge, LR. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, CR, IICA. 216 p. (Serie Libros y Materiales Educativos IICA no. 34).
- Holmann, F; Estrada. 1997. Alternativas agropecuarias en la región pacífica central de Costa Rica: Un modelo de simulación aplicable a sistemas de doble propósito. *In Lascano, C; Holmann, F.* eds. *Conceptos y metodologías de investigación en fincas con sistemas de producción animal de doble propósito*. Cali, CO, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Consorcio Tropileche. p. 134-150.
- Ibrahim, M; Camargo, JC. 2001. ¿Cómo aumentar la regeneración de árboles maderables en potreros? *Agroforestería en las Américas* 8(32): 35-41.
- Kaimowitz, D. 2001. Will livestock intensification help save Latin America's Tropical Forest? *In Angelsen, C; Kaimowitz, D.* eds. *Agricultural Technologies and Tropical Deforestation*. Wallingford, UK, CABI. p. 1-20.
- Ludwig, F; Kroon, H; Prins, HHT; Berendse, F; de Kroon, H. 2001. Effects of nutrients and shade on tree-grass interactions in an East African savanna. *Journal of Vegetation Science* 12(4): 579-588.
- Mannetje, L; Haydock, KP. 1963. The dry-weight-rank method for the botanical analysis of pasture. *Journal of the British Grassland Society* 18: 268-275.
- McDaniel, AH; Roark, CB. 1956. Performance and grazing habits of Hereford and Aberdeen-Angus cows and calves on improved pastures as related to types of shade. *Journal of Animal Science* 15(1):59-63.
- Mitlöhner, FM; Morrow, JL; Dailey, JW; Wilson, SC; Galyean, ML; Miller, MF; McGlone, JJ. 2001. Shade and water misting effects on behavior, physiology, performance and carcass traits of heat-stressed feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 79:2327-2335.
- Montenegro B, J; Abarca M, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica. San José, CR, Instituto Meteorológico Nacional. 135 p.
- Navas, A; Restrepo, C; Jiménez, G. 2001. Ruminant function in sheep supplemented with *Pithecellobium saman* pods. *In Ibrahim, M.* ed. *Silvopastoral Systems for Restoration of Degraded Tropical Pasture Ecosystems*. International Symposium on Silvopastoral System. San José, CR. p. 285-289.
- Schelhas, J. 1996. Land use choice and forest patches in Costa Rica. *In Shelhas, J; Greenberg, R.* eds. *Forest Patches in Tropical Landscapes*. Washington, US, Island Press. p. 258-284.
- Scherr, SJ; Current, D. 1997. What makes agroforestry profitable for farmers? Evidence from Central America and the Caribbean. *Agroforestry Today* 9(4):10-15.
- Souza de Abreu, MH. 2002. Contribution of trees to the control of heat stress in dairy cows and the financial viability of livestock farms in the humid Tropics. Ph.D. Thesis. Turrialba, CR, CATIE. p. 105.
- Szott, L; Ibrahim, M; Beer, J. 2000. The Hamburger Connection Hangover: cattle pasture land degradation and alternative land use in Central America. Turrialba, CR, CATIE. 71 p. (Informe Técnico no. 313).

Avances de Investigación

Diversidad de escarabajos estiercoleros en el bosque y en cacaotales con diferente estructura y composición florística en Talamanca, Costa Rica¹

Pedro Suatunce²; Eduardo Somarriba³; Celia Harvey³; Bryan Finegan⁴

Palabras claves: abundancia; agroforestería; biodiversidad; especies indicadoras; indígenas bribri y cabécar; investigación participativa; *Theobroma cacao*.

RESUMEN

Se estudió la riqueza de especies y la abundancia de escarabajos estiercoleros (Scarabaeidae) en cinco hábitats (bosques secundarios de baja alteración y cuatro tipologías de cacaotales) en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica. Se recolectaron escarabajos entre abril y junio del 2002 en 25 fincas (cinco por hábitat). En cada finca se utilizó una cuadrícula de 25 trampas de foso cebadas con estiércol de cerdo (cinco transectos paralelos de 40 m de largo, con cinco trampas por transecto). Se capturaron 36 especies de escarabajos, siendo la más abundante *Onthophagus acuminatus* (1723 individuos) y la menos frecuente *Canthon hartmanni* (un individuo). Los hábitats difirieron en el número de géneros y especies pero no en la abundancia de escarabajos, en el índice de dominancia de Berger-Parker o en los índices de diversidad y de equidad. El número de especies y el dap promedio de los árboles fueron las únicas variables del hábitat que correlacionaron significativamente con la riqueza de especies de escarabajos ($r^2 = 0,47$; $p = 0,09$); ninguna de las variables del hábitat correlacionó significativamente con la abundancia de escarabajos. Los resultados sugieren que los cacaotales de Talamanca pueden albergar una diversidad de escarabajos estiercoleros comparable a la de los bosques que rodean estas fincas.

Dung beetle diversity in forests and cacao plantations with different structures and floristic compositions in Talamanca, Costa Rica

Key words: Abundance; agroforestry; biodiversity; Bribri and Cabecar indigenous peoples; indicator species; participatory research; *Theobroma cacao*.

ABSTRACT

A study on dung beetle (Scarabaeidae) species richness and abundance in five habitats (slightly disturbed primary forests and four different types of cacao plantations) was carried out in the Talamanca indigenous reserve, Costa Rica. Dung beetles were collected between April and June 2002, in 25 farms (five per habitat). In each farm, a matrix of 25 pig dung-baited pitfall traps (five parallel transects, each 40 m long, with five traps per transect) was sampled. A total of 36 dung beetle species were collected. The most abundant species was *Onthophagus acuminatus* (1723 individuals) and the rarest was *Canthon hartmanni* (one individual). There were differences between habitats in the number of genus and species, but not in the abundance, Berger-Parker's dominance index and the diversity or equity indexes. The number of plant species and the average tree dbh were the only habitat variables that had significant correlation with dung beetle species richness ($r^2=0.47$; $p=0.09$); none of the habitat variables had a significant correlation with dung beetle abundance. The results suggest that the cacao systems in Talamanca could harbor comparable dung beetle diversity to the surrounding forests.

INTRODUCCIÓN

Los cafetales y cacaotales con sombra ofrecen una esperanza para la conservación de la biodiversidad (Thioly 1995, Klein *et al.* 2002, Somarriba *et al.* 2004), ya que por su alta diversidad vegetal y su estructura compleja

ofrecen una amplia variedad de hábitats, amortiguan y sirven de corredores para la fauna en los paisajes fragmentados (Estrada *et al.* 1993, Rice y Greenberg 2000). En Talamanca, Costa Rica, los cacaotales agroforestales

¹ Basado en Suatunce, P. 2002. Diversidad de escarabajos estiercoleros en bosques y en cacaotales de diferente estructura y composición florística, Talamanca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2002. Correo electrónico: jsuatunce@hotmail.com (autor para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: esomarri@catie.ac.cr; charvey@catie.ac.cr

⁴ Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, CATIE. Sede Central. Correo electrónico: bfinegan@catie.ac.cr

contribuyen a la conservación de la biodiversidad dentro las reservas indígenas (Parrish *et al.* 1999).

Los escarabajos estiercoleros (Scarabaeidae) pueden utilizarse como indicadores de la fragmentación del bosque por su sensibilidad a las perturbaciones, su dependencia de los organismos afectados por la fragmentación y por la facilidad de su captura e identificación (Klein 1989, Halfpeter *et al.* 1992). Los estudios comparativos de los efectos de la intervención humana sobre la biodiversidad pueden proveer datos útiles para manejar estos sistemas (Roth *et al.* 1994). En este artículo se analizan las diferencias y semejanzas en la diversidad y abundancia de escarabajos en el bosque y en cuatro tipos de cacaotales con diferente estructura y composición florística.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

La investigación se realizó en las reservas indígenas Bribri y Cabécar, al sureste de Costa Rica, en el distrito Bratsi, cantón de Talamanca, provincia de Limón, ubicada entre las coordenadas geográficas 9°00' - 9°50'N y 82°35' - 83°05'O. En la zona se distinguen dos unidades de paisaje: el valle, constituido por la coalescencia de abanicos aluviales de los ríos Telire, Larí, Uren y Yorkín, y las laderas, conformadas por materiales sedimentarios y rocas intrusivas. La altitud sobre el nivel del mar varía entre 40 y 150 m en el valle y entre 150 y 400 m en las laderas. El clima es tropical húmedo, con una precipitación anual de 2800 mm en el valle, que aumenta hasta los 6400 mm a elevaciones de entre 500 y 1000 m, con una estación lluviosa entre mayo y diciembre, con el 75% del total de la precipitación anual, y otra estación menos lluviosa entre enero y abril. La temperatura media anual en el valle es de 25,6 °C, con máximas de 30,5 °C y mínimas de 20,4 °C, un promedio de 4,5 horas luz día⁻¹ y radiación promedio de 15 Mj m⁻² día⁻¹. Las principales zonas de vida son el bosque muy húmedo transición a premontano, el bosque húmedo tropical y el bosque muy húmedo premontano transición a basal (Kapp 1989). La topografía del valle es plana cóncava y plana ondulada, con pendientes inferiores al 13% (Kapp 1989, Borge y Villalobos 1995).

Metodología

El estudio de escarabajos se llevó a cabo en cinco hábitats, incluyendo cuatro tipos de cacaotales y el bosque, a razón de cinco fincas por hábitat (25 fincas en total). La tipología de los cacaotales fue establecida visualmente con base en la riqueza y abundancia de especies vege-

tales y en la estratificación vertical del dosel de sombra. La caracterización de la vegetación se hizo con base en inventarios de parcelas temporales de 1000 m², a razón de siete parcelas por hábitat. Las tipologías fueron las siguientes:

- **Cacao multiestratificado:** más de tres especies de árboles remanentes del bosque natural o de la regeneración natural, un dosel con más de tres estratos y entre 55 y 60% del área con sombra.
- **Cacao con especies arbóreas y frutales:** más de dos especies arbóreas remanentes del bosque natural o de regeneración natural asociadas con especies frutales, un dosel con más de dos estratos y 35-40% del área con sombra.
- **Cacao con especies arbóreas y musáceas:** más de dos especies arbóreas remanentes o de regeneración del bosque natural asociadas con musáceas, un dosel con más de dos estratos y 35-40% del área con sombra.
- **Cacao con estrato simple:** un máximo de dos especies de sombra, constituidas por *Cordia alliodora* y/o *Inga* spp., un dosel de uno o dos estratos y 35-40% del área con sombra.
- **Bosque:** bosques secundarios de baja alteración (25–100 años de edad), con una extensión de 3 a 10 ha en parches dentro de los sistemas agrícolas y separados entre sí por distancias mayores a 500 m.

Las fincas se ubicaron en las comunidades de Watsi, Tsuri, Amubri, Cachabri, Sibuju, San Miguel y San Vicente. La distancia de un hábitat a otro varió desde 0,5 a más de 10 km.

Muestreo de escarabajos

El monitoreo de los escarabajos fue realizado por 25 productores indígenas debidamente capacitados mediante cursos-talleres sobre la metodología de recolección y preparación de recolecciones, complementados con reuniones frecuentes de seguimiento. El muestreo tomó dos días por mes; en el primer día se colocaron las trampas y al día siguiente se recolectaron los escarabajos capturados. En cada finca, los productores establecieron cinco transectos de 40 m de largo, separados por 10 m entre sí, y en cada transecto se colocaron cinco trampas, una cada 10 m a lo largo del transecto. Se utilizaron trampas de foso (“*pitfall traps*”), cebadas con aproximadamente 20 g de estiércol de cerdo. Se empleó un vaso de plástico de 350 cc de capacidad, con 150 cc de una mezcla de agua y detergente, enterrado al nivel del suelo, con una malla metálica donde se colocó el cebo, levantada con pequeños trozos de madera a 4 cm sobre



Monitoreo de escarabajos realizado por finqueros indígenas de Talamanca, Costa Rica (foto: Archivo Proyecto Cacao y Biodiversidad CATIE-GEF-Banco Mundial).

el suelo y luego cubierta con un plato plástico invertido para tapar la lluvia, proteger el cebo y evitar que el vaso se llenara y se rebalsara, perdiendo escarabajos. Los escarabajos capturados se recogieron en recipientes con alcohol y se enviaron al Instituto Nacional de Biodiversidad (INBIO) de Costa Rica para su identificación. Los datos presentados en este artículo corresponden a las capturas de los meses de abril, mayo y junio del 2002.

Análisis de datos

La diversidad de especies se estimó utilizando el índice de diversidad de Shannon–Weiner (H'):

$$H' = - \sum [(n_i / N) \log (n_i / N)] \quad [1]$$

Donde:

n_i = número de individuos de cada especie
 N = número total de individuos de todas las especies
 \log = logaritmo natural

Se calculó la equidad de las especies dentro de los hábitats (E) con el índice $E = H'/H'_{\max}$, donde $H'_{\max} = \log S$

y S es la riqueza o número de especies de la colección. La dominancia de las especies en los hábitats se estimó mediante el inverso (d^{-1}) del índice (d) de Berger–Parker (Magurran 1988):

$$d = n_{\max} N^{-1} \quad [2]$$

Donde:

n_{\max} = número de individuos de la especie más abundante

La semejanza entre pares de hábitats se estimó con el índice de Sørensen (C_s):

$$C_s = 2c(a + b)^{-1} \quad [3]$$

Donde:

c = número de especies comunes en ambos hábitats
 a = número de especies en el hábitat A
 b = número de especies en el hábitat B

Las diferencias en la riqueza, diversidad y abundancia de escarabajos entre los cacaotales y el bosque y entre las diferentes tipologías de cacaotales se evaluaron con un ANOVA simple y con pruebas de Tukey para las comparaciones de medias. El efecto de la vegetación sobre la riqueza y abundancia de escarabajos se analizó mediante una regresión múltiple, utilizando como variables independientes la abundancia, diámetro promedio del tallo de los árboles a la altura del pecho promedio (dap; > 10 cm), área basal, y altura promedio de la vegetación por hábitat (cinco parcelas de 1000 m² por hábitat).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Vegetación

Los bosques contienen el mayor número de familias, géneros, especies e individuos de plantas de todos los hábitats; los diferentes tipos de cacaotales mostraron un gradiente decreciente en todos estos parámetros cuando se pasó de cacaotales multiestratificados a cacaotales muy simples, con un solo estrato de sombra en el dosel (Cuadro 1).

Diversidad de escarabajos

Se recolectaron 6947 individuos de escarabajos, pertenecientes a 36 especies y 14 géneros. Se encontraron dos especies nuevas, una para la zona (*Canthidium* sp. 145) y otra para el país (*Ateuchus* sp. 1), las cuales se recolectaron en el bosque y en los cacaotales. Las especies más abundantes, en orden descendente, fueron: *Onthophagus acuminatus* (1723 individuos), *Canthon aequinoctialis* (1663), *Canthon meridionalis* (755) y *Canthon moniliatus* (608). Las especies raras fueron *Canthon hartmanni*, con un solo individuo,



Establecimiento de parcelas en los diferentes hábitats estudiados en los cuatro tipos de cacaotales y bosque de fincas indígenas de Talamanca, Costa Rica (foto: Archivo Proyecto Cacao y Biodiversidad CATIE-GEF-Banco Mundial).

y *Canthidium centrale*, *Canthidium vespertinum*, *Onthophagus marginicollis* y *Pedaridium pilosum*, con cuatro individuos cada una. Los hábitats difirieron en el número de géneros ($F_{4,20} = 4,38; p = 0,01$) y especies ($F_{4,20} = 4,52; p = 0,01$), pero no en la abundancia de escarabajos, en el índice de dominancia de Berger-

Cuadro 1. Número de familias, géneros, especies e individuos de árboles y otras leñosas perennes (dap >10 cm) en el bosque y en varios tipos de cacaotales de Talamanca, Costa Rica

Variable	Hábitats ^(a)					Total
	Bosque	Cacao multiestratificado	Cacao con especies arbóreas y frutales	Cacao con especies arbóreas y frutales	Cacao con estrato simple	
Familias	54	21	18	12	2	55
Géneros	109	32	22	16	2	132
Especies	149	38	27	17	2	185
Individuos	394	104	109	114	84	805

^(a)Área de muestreo por hábitat = 7000 m².

Cuadro 2. Escarabajos estiercoleros por hábitat: promedio (\bar{x}) y desviación estándar (s) del número de géneros, especies y total de individuos, índices de diversidad (H') y equidad (E) de Shannon e índice de dominancia de Berger-Parker (d^{-1})

Variables	Hábitats									
	Bosque		cacao		cacao con especies arbóreas y frutales		cacao con especies arbóreas y musáceas		cacao con estrato simple	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Géneros	10,2 a	1,3	8,4 ab	0,5	7,4 ab	2,9	5,6 b	1,0	7,6 ab	0,8
Especies	18,2 a	1,6	16,2 a	2,2	14,8 ab	4,1	9,4 b	1,2	14,2 ab	5,8
Individuos	252 a	110	227 a	151	255 a	49	213 a	111	443 a	362
H'	1,9 a	0,2	1,8 a	0,3	1,7 a	0,5	1,2 a	0,4	1,6 a	0,4
E	0,6 a	0,1	0,6 a	0,1	0,6 a	0,1	0,5 a	0,2	0,6 a	0,2
d^{-1}	3,2 a	0,4	2,7 a	0,8	2,1 a	1,2	2,1 a	0,8	2,7 a	1,8

Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,01$).

Parker ni en los índices de diversidad y de equidad. Los bosques tuvieron algunas especies y géneros más de escarabajos que todos los cacaotales, los cuales difirieron ligeramente entre sí (Cuadro 2). Los índices de similaridad de Sørensen reflejan claramente esta semejanza entre hábitats en términos de la composición de especies, ya que cualquier par de hábitats comparte entre 70 y 90% de las especies.

Al igual que los cacaotales, los bosques son parches pequeños dentro de los paisajes agrícolas, donde los cerdos domésticos pasean libremente y pueden haber causado buena parte de la semejanza entre las comunidades de escarabajos (Ridsdill-Smith 1991, Estrada *et al.* 1993, Guiracocha *et al.* 2001). Varias de las especies capturadas (por ejemplo, *C. vespertinum*, *Copris insertus*, *Eurysternus plebejus*, *O. acuminatus* y *P. pilosum*) tienen hábitos generalistas y pueden encontrarse en el bosque, en áreas abiertas y en cacaotales (Aguilar 1999). Los hábitats comparten algunas especies vegetales y la cobertura arbórea influye fuertemente sobre la diversidad de Scarabaeidae (Lumaret y Kirk 1987, Halffter y Matthews 1966, Lobo *et al.* 1998).

Efectos de la vegetación sobre la riqueza y abundancia de escarabajos

El modelo de regresión múltiple explicó el 47% de la variación ($p = 0,09$) en la riqueza de especies de escarabajos por hábitat; la riqueza de especies vegetales y el dap promedio fueron las únicas variables de la vege-

tación (del hábitat) que se relacionaron en forma estadísticamente significativa ($p = 0,09$) con el número de especies de escarabajos. Ninguna variable de vegetación correlacionó significativamente con la abundancia de escarabajos.

CONCLUSIONES

El número de especies y de géneros de escarabajos varió significativamente dependiendo del hábitat, no así su abundancia ni los índices de diversidad, equidad y dominancia. Los bosques tienen más especies y géneros de escarabajos que los cacaotales, los cuales varían entre sí dependiendo de su composición botánica y estructura vertical. Los cacaotales más diversos y estructurados retuvieron más especies y géneros de escarabajos que los cacaotales con dosel muy simple. El número de especies vegetales y el diámetro promedio de los troncos de los árboles correlacionaron significativamente con el número de especies de escarabajos encontrados en cada hábitat. Estos resultados sugieren que los cacaotales de Talamanca pueden albergar una diversidad de escarabajos estiercoleros comparable a la de los bosques que rodean estas fincas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aguilar, N. 1999. Criterios e indicadores de sostenibilidad ecológica: caracterización de la respuesta de dos grupos de insectos propuestos como verificadores. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 74 p.
- Borge, C; Villalobos, V. 1995. Talamanca en la encrucijada. San José, Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia. 121 p.

- Estrada, A; Halffter, G; Coates-Estrada, R; Meritt jr, D. 1993. Dung beetles attracted to mammalian herbivore (*Alouatta palliata*) and omnivore (*Nasua narica*) dung in the tropical rain forest of los Tuxtlas, Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 9: 45-54.
- Guiracocha, G; Harvey, C; Somarriba, E; Krauss, U; Carrillo, E. 2001. Conservación de la biodiversidad en sistemas agroforestales con cacao y banano en Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(8): 7-11.
- Halffter, G; Matthews, EG. 1966. The natural history of dung beetles of the subfamily Scarabaeinae (Coleoptera, Scarabaeidae). *Folia Entomológica Mexicana* 12-14: 1-312.
- _____; Favila, M; Halffter, V. 1992. A comparative study of the structure of the scarab guild in Mexican tropical rain forest and derived ecosystems. *Folia Entomológica Mexicana* 84: 131-156.
- Kapp, GB. 1989. Perfil ambiental de la zona baja de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, CR, CATIE. 97 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 155).
- Klein, BC. 1989. Effects of forest fragmentation on dung and carrion beetle communities in central Amazonian. *Ecology* 70(6): 1715-1725.
- Klein, AM; Dewenter, IS; Buchori, D; Tschardtke, T. 2002. Effects of land-use intensity in tropical agroforestry systems on coffee flower-visiting and trap-nesting bees and wasps. *Conservation Biology* 16 (4): 1003-1014.
- Lobo, JM; Lumaret, JP; Jay-Robert, P. 1998. Sampling dung beetles: effects of abiotic factors and farm practices. *Pedobiologie* 42: 252-266.
- Lumaret, JP; Kirk, A. 1987. Ecology of the dung beetles in the French Mediterranean region (Coleoptera: Scarabaeidae). *Acta Zoológica Mexicana* 24: 155.
- Magurran, AE. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton, NJ, US, Princeton University Press. 179 p.
- Parrish, J; Reitsma, R; Greenberg, R; McLarney, W; Mack, R; Lynch, J. 1999. Los cacaotales como herramienta para la conservación de la biodiversidad en corredores biológicos y zonas de amortiguamiento. *Agroforestería en las Américas* 6(22):16-19.
- Rice, RA; Greenberg, R. 2000. Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio* 29(3): 167-173.
- Ridsdill-Smith, J. 1991. Competition in dung-breeding insects. *In* Bailey, WJ; Ridsdill-Smith, J. eds. *Reproductive behavior of insects. Individuals and populations*. London, UK, Chapman and Hall. p. 264-292.
- Roth, DS; Perfecto, I; Rathcke, B. 1994. The effects of management systems on ground-foraging ant diversity in Costa Rica. *Ecological Application* 4(3): 423-436.
- Somarriba, E; Harvey, CA; Samper, M; Anthony, F; González, J; Staver, C; Rice, R. 2004. Conservation of biodiversity in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations. *In* *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes*, Eds. G. Schroth, G. Fonseca, C.A. Harvey, C. Gascon, H. Vasconcelos and A.M.N. Izac. Island Press, Washington. p. 198-226.
- Thioly, JM. 1995. The role of traditional agroforests in the conservation of rainforest bird diversity in Sumatra. *Conservation Biology* 9: 335-353.

Avances de Investigación

Caracterización de los sistemas silvopastoriles tradicionales del distrito de Bugaba, Provincia de Chiriquí, Panamá¹

Rodrigo Cerrud²; Cristóbal Villanueva³; Muhammad Ibrahim⁴; Dietmar Stoian³; Humberto Esquivel⁵

Palabras claves: abundancia de especies; árboles dispersos; cercas vivas; riqueza; sistemas de producción bovina; usos de los árboles.

RESUMEN

Se caracterizaron los sistemas silvopastoriles en fincas ganaderas de tres corregimientos del distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá. En una primera fase, en 89 fincas ganaderas, fue recogida información biofísica y socioeconómica sobre el agricultor y la finca por medio de una encuesta semi-estructurada. En una segunda fase, fueron seleccionadas 18 fincas (seis por corregimiento) para realizar un inventario detallado de los árboles dispersos en potreros y en cercas vivas, usando parcelas temporales seleccionadas al azar. Los sistemas de producción bovina fueron lechería especializada (61%) y doble propósito (39%). El 95% de las fincas tuvieron árboles dispersos en potreros y en cercas vivas. Las especies arbóreas de mayor predominio en los potreros fueron: en Santa Marta y Santo Domingo, *Citrus sinensis*, con 52 y 26% del total de individuos ($n = 829$), respectivamente; y en Sortová, *Tabebuia rosea* (33%). La densidad de brinzales y latizales no mostró diferencia significativa entre corregimientos ($p < 0,05$), mientras que se encontró más fustales en Sortová ($p < 0,05$; 108 árboles ha^{-1}). Los frutales dominaron en los potreros (40%), seguidos por maderables (35%) y árboles de uso múltiple (25%). Las especies más importantes para cada uso fueron *C. sinensis*, *T. rosea* y *Diphysa robinoides*, respectivamente. En cercas vivas, predominaron las especies *Gliricidia sepium*, con 78 y 63% de todos los árboles encontrados en cercas vivas en Santa Marta y Santo Domingo, respectivamente; y *D. robinoides* (82%) en Sortová. Los árboles de uso múltiple dominaron en cercas vivas (97%).

Characterization of traditional silvopastoral systems in the Bugaba district of Chiriqui, Panama

Key words: Cattle production systems; live fences; richness; species abundance; tree uses.

ABSTRACT

Traditional silvopastoral systems were characterized in three districts (Santa Marta, Santo Domingo and Sortova) of Bugaba, Chiriqui, Panama. In the first phase of this study, a semi-structured interview was conducted with cattle farmers ($n = 89$) to collect socio-economic and biophysical information about the farmer and the farm. The second phase involved the random selection of six farms in each district (18 in total) to make a detailed inventory of trees in pastures and in live fences using temporary randomly selected sample plots. The cattle farms were classified as dairy (61%) and dual purpose (39%); 95% had live fences and trees in pastures. *Citrus sinensis* was the most common tree species in Santa Marta and Santo Domingo pastures, with 52 and 26% of total individuals ($n = 829$), respectively. In Sortova, *Tabebuia rosea* (33% of all trees) was the most common. The density of saplings and of young trees did not differ between districts ($p < 0.05$). However, the Sortova pastures had a higher density of mature trees (108 trees ha^{-1} ; $p < 0.05$). In pastures, fruit trees dominated (40%), followed by timber (35%) and multipurpose (25%) species. *C. sinensis*, *T. rosea* and *Diphysa robinoides* were the main fruit, timber and multipurpose species, respectively. *Gliricidia sepium* was the most common live fence post species in farms of Santa Marta (78% of all live fence trees) and Santo Domingo (63%) and *D. robinoides* (82%) in farms of Sortova. Multi purpose species dominated as live fence posts (97%).

¹ Basado en: Cerrud, RA. 2002. Caracterización de los sistemas silvopastoriles tradicionales en el distrito de Bugaba-Panamá. Tesis M.Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2002. Correo electrónico: r77cerrud@hotmail.com (autor para correspondencia).

³ Investigador Proyecto FRAGMENT/CATIE. Correo electrónico: cvillanu@catie.ac.cr

⁴ Profesores-investigadores. CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: mibrahim@catie.ac.cr; stoian@catie.ac.cr

⁵ Candidato Doctoral en Agroforestería, CATIE-Bangor. Correo electrónico: hesqui@catie.ac.cr

INTRODUCCIÓN

En las fincas ganaderas de América Central, es común la presencia de sistemas silvopastoriles (SSP) tradicionales, bajo las modalidades de árboles dispersos en potreros y cercas vivas. Las especies leñosas brindan diversos beneficios a las fincas ganaderas, tales como sombra y alimento para el ganado, madera, postes y leña (Holmann *et al.* 1992, Souza de Abreu 2002). Las cercas vivas desempeñan otras funciones específicas, como la delimitación de propiedades, divisiones y protección de los diferentes usos del suelo dentro de las fincas. Asimismo, los árboles pueden incrementar la producción y el contenido de N de las gramíneas asociadas, e incorporan materia orgánica al suelo, mejorando su estructura y permeabilidad. También pueden funcionar como bombas extractoras de agua y nutrientes desde las capas más profundas del suelo (MacDicken y Vergara 1990, Rodríguez *et al.* 2001).

El objetivo de este estudio fue caracterizar el componente arbóreo en los sistemas silvopastoriles tradicionales en fincas ganaderas de tres corregimientos del distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá. Ello permitió conocer la riqueza, abundancia, similitud, usos de los árboles y rendimiento de madera aprovechable en las opciones silvopastoriles de árboles dispersos en potreros y cercas vivas en esta zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los corregimientos de Santa Marta (30 km²), Santo Domingo (51 km²) y Sortová (35 km²), del distrito de Bugaba, Provincia de Chiriquí, Panamá (8°25' a 8°40'N y 82°32' a 82°45'O, 138 a 560 msnm, temperatura media anual de 25,4 °C, evaporación promedio diaria de 4,5 mm y precipitación media anual de 3,700 mm). Los suelos predominantes son inceptisoles, franco arenosos, con topografía plana en los corregimientos de Santa Marta y Santo Domingo y ondulada en Sortová, con pH de alrededor de 5,5 y un

déficit hídrico de cinco meses desde finales de diciembre hasta mediados de abril (IDIAP 1991).

El estudio abarcó dos etapas: a) caracterización biofísica y socioeconómica de las fincas ganaderas con tendencia lechera ($n = 89$) dentro de los corregimientos ya indicados, con base en una entrevista semiestructurada a los propietarios de las fincas; y b) estudio detallado de los SSP en 18 fincas (seis por corregimiento), distribuidas de manera proporcional a la frecuencia en la población total, según el tamaño de finca; es decir, tres menores (fincas menores a 50 ha), dos medianas (fincas entre 51 y 100 ha) y una grande (mayor a 100 ha).

Los principales datos recolectados en la primera etapa fueron: a) socioeconómicos (educación del propietario, tenencia de la propiedad, tamaño de finca, sistema de producción y mano de obra empleada); b) manejo de potreros (carga animal, período de descanso, período de ocupación, fertilización y control de malezas, especies de pastos y número de apartos); c) características del hato bovino (genética, alimentación, salud animal y productividad de leche); y d) presencia de SSP en la finca.

En la segunda etapa, se consideraron como criterios de selección la presencia de los SSP tradicionales (árboles dispersos en potreros y cercas vivas) y la disposición del propietario a cooperar con el presente estudio. Entre las fincas que cumplieron con estos dos criterios, la selección se hizo al azar, mediante una tabla de números aleatorios. En cada una de ellas se ubicaron tres grupos de tres parcelas circulares dentro del SSP de árboles dispersos en potreros. Para la ubicación de las parcelas, se estableció un punto de referencia en el perímetro de la finca en la dirección noroeste; luego, por medio de la tabla de números aleatorios se determinó el número de pasos para la identificación del punto central de cada grupo de tres parcelas en dirección sudeste (todos los

Cuadro 1. Tamaño, número de parcelas y variables medidas en los distintos estadios sucesionales arbóreos en pastizales en los corregimientos de Santa Marta, Santo Domingo y Sortová, distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá

Estado de sucesión	Dimensiones	Parcela		Parcelas por finca (n)	Variables
		Área (m ²)	Radio (m)		
Brinzales	0,30 m < h < 1,5 m	201	8,0	3	Diversidad y abundancia de especies; altura total.
Latizales	h > 1,5 m; dap < 5 cm	452	12,0	3	Diversidad y abundancia de especies; dap y altura total.
Fustales	dap ≥ 5 cm	804	16,0	3	Diversidad y abundancia de especies; dap, altura total y comercial.

puntos centrales de muestreo se derivaron del mismo punto de referencia), procurando cubrir el área donde se localizó el SSP. Cuando existió traslape entre grupos de parcelas, se repitió la selección del punto central con este problema. El tamaño de la parcela grande fue de 804 m² (16 m de radio), en la cual se contaron e identificaron las especies arbóreas en los diferentes estadios de la sucesión vegetal (brinzales, latizales y fustales); además, en los fustales se midió el diámetro del tallo a la altura del pecho (dap), altura total y altura comercial (Cuadro 1).

Para la evaluación de las cercas vivas, se numeraron todas las cercas en las fincas seleccionadas. Se eligieron cuatro cercas por finca con ayuda de la tabla de números aleatorios; luego, se estableció una parcela lineal temporal de 30 m en el punto medio de cada cerca. En cada parcela se registró la siguiente información: conteo e identificación de las especies, altura total, altura de fuste y altura de poda de los individuos.

En cada parcela de medición —tanto para árboles dispersos en potrero (clase fustales) como para cercas vivas—, se estimó el volumen de madera comercial en especies maderables con dap (d) < 35 cm y \geq 35 cm. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\text{Volumen de madera comercial (m}^3\text{)} = (\Pi d^2 / 4) * L * f$$

Donde:

d = diámetro del tallo a la altura del pecho (m)

L = altura comercial del fuste (m)

f = factor de forma

Con respecto al factor de forma, fueron considerados 0,45; 0,42 y 0,39, los cuales corresponden a árboles con fuste recto, fuste poco sinuoso y fuste curvo o sinuoso, respectivamente (Prodan *et al.* 1997).

Las variables cuantitativas y cualitativas (relacionadas con la caracterización biofísica y socioeconómica de las fincas ganaderas) fueron analizadas por medio de la estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) y la prueba de chi cuadrado, respectivamente. En ambos arreglos SSP, se evaluó el índice de Jaccard para conocer el grado de similitud de especies entre corregimientos (Magurran 1989). Las variables medidas en la vegetación de los SSP, al igual que el número de árboles por categoría de uso (frutales, maderables y uso múltiple⁶), fueron evaluadas mediante

análisis de varianza (ANDEVA). Para ello se utilizó un diseño estadístico completamente al azar, donde los tratamientos fueron los corregimientos (tres) y las repeticiones las fincas (seis) seleccionadas por corregimiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los productores

El 71% de los productores ($n=89$) contó con un nivel de educación primaria, 23% secundaria y 6% universitaria. En general (en los tres corregimientos), el 88% de los propietarios residió permanentemente en la finca, con un máximo de 97% en el Corregimiento de Sortová. El 57% de los productores fue mayor de 50 años. El 52% de los productores indicó haber participado en cursos de capacitación de ganadería o manejo de la finca, incluyendo aspectos relacionados con los beneficios de los árboles en las fincas.

Características de las fincas

Las fincas tuvieron un tamaño promedio de 28 ± 3 ha. El 58% de las fincas tuvo entre 10 y 50 ha, el 26% menos de 10 ha y el 16% más de 50 ha. Estas fincas se clasificaron en los sistemas de producción bovina especializada en la producción de leche y de doble propósito (leche y carne), con valores del 61 y 39%, respectivamente. Un 63% de las fincas estaban administradas por sus propietarios, 20% por familiares y 17% por particulares.

De los 89 productores consultados, 47% llevaban menos de 20 años de dedicarse a la ganadería, 27% entre 20 y 40 años y el 26% más de 40 años de experiencia. En las fincas de doble propósito, prevalecieron los cruces entre las razas cebú (Gyr o Brahmán) con las razas lecheras (Brown Swiss, Holstein y Jersey). En el caso de las fincas especializadas en leche, predominaron las razas Brown Swiss, Holstein y Jersey. Las fincas manejaron en promedio 16 ± 12 vacas en producción, una carga animal⁷ de $1,6 \pm 1$ UA ha⁻¹ y una producción de leche $5,2 \pm 2,3$ L vaca⁻¹ día⁻¹.

El 95% de las fincas presento árboles dispersos en potreros y el 96% presentó cercas vivas. En Santa Marta y Santo Domingo fueron más comunes las especies usadas para sombra y leña (57 y 46% de las fincas, respectivamente), mientras en Sortová el 38% de las fincas tuvo árboles frutales dispersos en potreros, pues al limpiar los potreros los productores dejaron una mayor cantidad de árboles de *Citrus sinensis*, los cuales les generan ingresos por la venta de frutos y leña

⁶ Uso múltiple: especies arbóreas que brindan varios beneficios al finquero (i.e., leña, postes, alimento para el ganado, etc).

⁷ Unidad animal (UA), equivalente a 400 kg de peso vivo.

proveniente de raleos y podas. En Santa Marta y Santo Domingo, las tierras fueron de menor altitud (138–300 msnm), con temperaturas más elevadas en el verano, lo cual aumentó la preferencia de los productores por árboles que proporcionaran sombra a los animales y así disminuyeran el estrés calórico.

Árboles dispersos en potreros

En las parcelas medidas en las 18 fincas seleccionadas (4,3 ha en total), se encontraron 829 individuos dispersos en potreros (incluyendo brinzales, latizales y fustales), pertenecientes a 22 familias y 41 especies. En la clase fustal, la especie arbórea que prevaleció en cada corregimiento fue *C. sinensis* para Santa Marta y Santo Domingo y *Tabebuia rosea* para Sortová. Además, conviene agregar que las especies *C. sinensis*, *T. rosea* y *Diphysa robinoides* fueron comunes en los tres corregimientos (Fig. 1). Existió un consenso similar en los tres sitios sobre el manejo y la importancia de estas especies, las cuales son apreciadas por su producción de frutos para consumo humano y animal, madera y postes, respectivamente.

En Santo Domingo, la densidad arbórea de brinzales en potreros (672 árboles ha⁻¹) fue 2,5 veces mayor que en Sortová; sin embargo, no hubo diferencia significativa debido a la alta variabilidad entre fincas dentro del mis-

mo corregimiento. Igualmente, no se encontró diferencia significativa para los latizales, siendo Santa Marta donde se presentó la mayor densidad promedio (17 árboles ha⁻¹). Respecto a los fustales, no se encontró diferencia significativa entre Santa Marta y Santo Domingo, pero sí con Sortová, el cual presentó el mayor promedio de densidad arbórea (108 árboles ha⁻¹) ($p < 0,05$) (Cuadro 2). Estas cifras son menores a las encontradas por Camargo *et al.* (1999) y mayores que las reportadas para potreros por Casasola (2000). Además, no presentaron una distribución sucesional adecuada (por el bajo número de latizales). Esta distribución indeseada de los latizales se podría atribuir al manejo de las pasturas con alta carga animal (1,6 UA ha⁻¹) y al control sistematizado de malezas (principalmente con herbicidas), lo cual no estaría permitiendo que la mayoría de brinzales alcancen el estadio de latizales. Esta situación podría generar en el futuro una disminución de los árboles dispersos en el potrero si no se adoptan las estrategias pertinentes en el manejo de la regeneración natural. Es importante destacar que las fincas mostraron una gran variabilidad dentro de los corregimientos, lo cual podría estar relacionado con el manejo diferente de las pasturas (carga animal, número y tamaño de potreros, período de descanso, período de ocupación y control de malezas) o con la escasa presencia de árboles semilleros en los potreros.

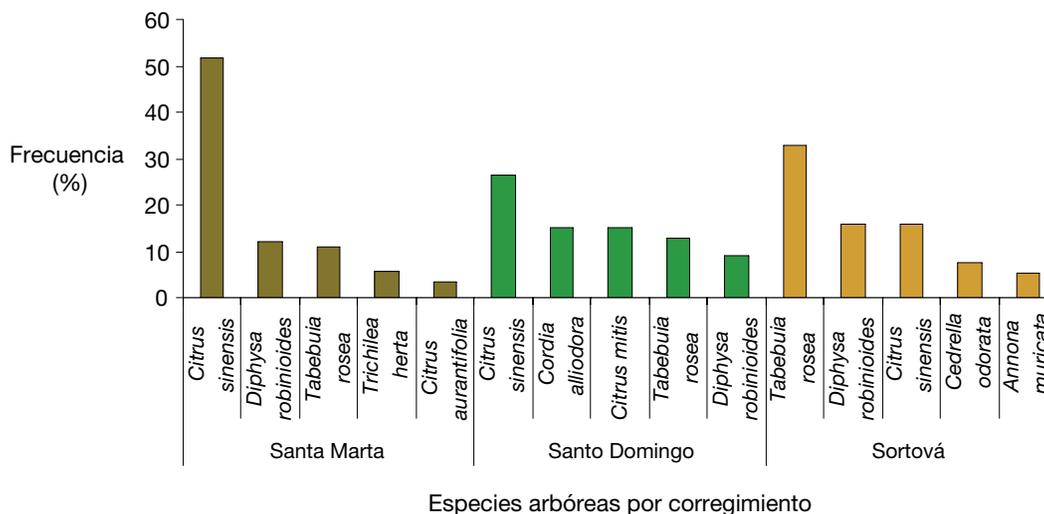


Figura 1. Frecuencia de las especies arbóreas más comunes dispersas en potreros (clase fustales) en los corregimientos de Santa Marta, Santo Domingo y Sortová, distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá.

Cuadro 2. Promedio y desviación estándar de la densidad de la sucesión arbórea en potreros de los corregimientos de Santa Marta, Santo Domingo y Sortová, distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá

Corregimientos	Densidad por estadio sucesional (individuos ha ⁻¹)			
	Brinzales	Latizales	Fustales	Total
Santa Marta	387±113 a	17±9 a	63±18 b	467±124 a
Santo Domingo	672±200 a	2±1 a	60±10 b	734±199 a
Sortová	260±165 a	3±2 a	108±12 a	371±169 a

Letras iguales en la misma columna indican que no existe diferencia estadística significativa según prueba de Duncan ($p < 0,05$).

Usos de los árboles dispersos en potreros

Al clasificar los árboles, se encontró una preferencia por frutales (40%), maderables (35%) y, en menor grado, uso múltiple (25%), representados por *C. sinensis*, *T. rosea* y *D. robinoides*, respectivamente. A nivel de corregimientos, el grupo de frutales fue el más importante para Santa Marta (57%) y Santo Domingo (49%); en Sortová, el grupo de mayor importancia fue el de las maderables (47%). Con respecto a la densidad de árboles según el uso, únicamente el grupo de maderables mostró diferencia significativa entre corregimientos ($p < 0,05$), siendo Sortová el que presentó el valor superior ($59 \pm 8,8$ árboles ha⁻¹); esta densidad coincidió con lo reportado para la Zona Atlántica de Costa Rica por Villafuerte (1998). Los productores prefirieron tener en potrero especies frutales (*C. sinensis*, *Citrus mitis*, *Citrus aurantifolia* y *Annona muricata*), maderables (*T. rosea*, *Cedrela odorata* y *Cordia alliodora*) y árboles de uso

múltiple (*D. robinoides*, *Trichilia herta* y *Platypodium elegans*) con una arquitectura de copa que permite una mayor entrada de luz solar para no afectar la producción de biomasa de las gramíneas. Esta concepción de los productores concuerda con lo encontrado en los estudios de Camargo *et al.* (2000) y Cruz (2002).

Volumen de madera en árboles dispersos en potreros

Sortová presentó el mayor volumen de madera comercial, con 7,3 m³ ha⁻¹ (dap <35 cm = 4,2 m³ ha⁻¹; dap ≥35 cm = 3,1 m³ ha⁻¹). La familia Meliaceae, con las especies *C. odorata* (0,14 m³ ha⁻¹) y *T. herta* (0,92 m³ ha⁻¹), presentó el mayor volumen de madera en la categoría comercial. El corregimiento de Santa Marta presentó el menor volumen (1,6 m³ ha⁻¹) de madera, donde solo 0,66 m³ ha⁻¹ corresponden a la categoría de madera comercial aprovechable (Cuadro 3). Estos volúmenes son menores a los encontrados por Souza de Abreu (2002) en SSP en Costa Rica.

Índice de diversidad de Jaccard para árboles dispersos en potreros

La mayor similitud de especies, de acuerdo con el índice de Jaccard, se presentó entre Santa Marta y Santo Domingo (0,56); el índice más bajo se registró entre Santa Marta y Sortová (0,42). Esto probablemente se pueda explicar por la menor diferencia de altura que existe entre Santa Marta y Santo Domingo (138 - 240 msnm) en comparación con Sortová (560 msnm). Además, la topografía en Sortová es más irregular, con suelo de origen volcánico y mayor porcentaje de materia orgánica.

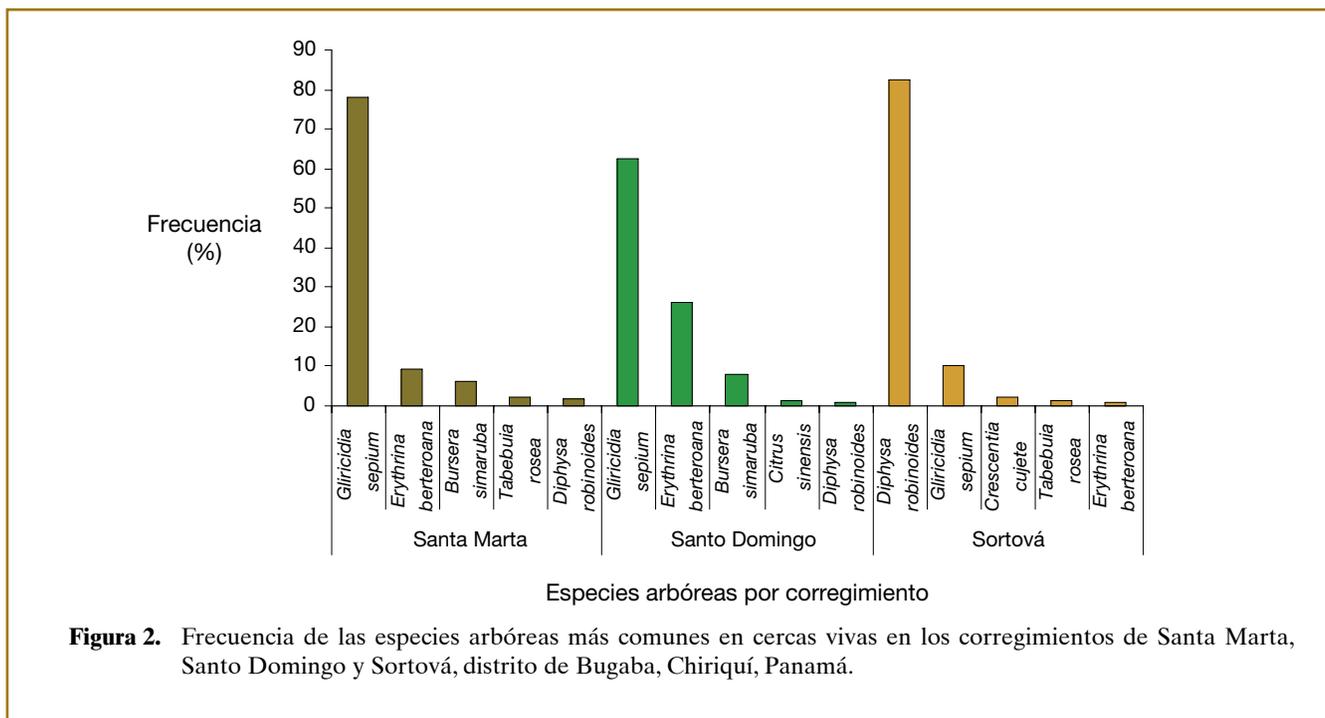


Figura 2. Frecuencia de las especies arbóreas más comunes en cercas vivas en los corregimientos de Santa Marta, Santo Domingo y Sortová, distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá.

Cuadro 3. Volumen de madera comercial por especie de árboles dispersos en potreros en los corregimientos de Santa Marta, Santo Domingo y Sortová, distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá

Especies en los corregimientos	Volumen de madera (m ³ ha ⁻¹)		Total
	dap <35 cm	dap ≥35 cm ^(a)	
Santa Marta			
<i>Cassia fistulas</i>	0,12	—	
<i>Cedrela odorata</i>	0,12	—	
<i>Cordia alliodora</i>	0,04	0,13	
<i>Diphysa robinoides</i>	0,21	0,34	
<i>Jacaranda caucana</i>	0,02	—	
<i>Tabebuia rosea</i>	0,46	0,18	
<i>Trichilia herta</i>	0,01	—	
Total	0,98	0,66	1,64
Santo Domingo			
<i>C. odorata</i>	—	0,14	
<i>C. alliodora</i>	0,76	0,10	
<i>D. robinoides</i>	0,10	0,44	
<i>Pithecolobium saman</i>	0,03	—	
<i>T. rosea</i>	0,37	0,23	
<i>T. herta</i>	0,08	0,92	
Total	1,33	1,83	3,16
Sortová			
<i>C. odorata</i>	0,41	0,83	
<i>C. alliodora</i>	0,19	—	
<i>D. robinoides</i>	0,32	0,79	
<i>Guarea</i> spp.	0,04	—	
<i>Tabebuia guayacan</i>	0,54	0,43	
<i>T. rosea</i>	2,70	0,63	
<i>Platypodium elegans</i>	0,01	0,37	
Total	4,22	3,06	7,28

(a) Árboles aprovechables.

Árboles en cercas vivas

En una longitud total de 2,16 km de parcelas en cercas vivas, se registraron 2206 árboles, pertenecientes a 15 familias y 18 especies. Las especies *Gliricidia sepium*, *Erythrina berteroana* y *D. robinoides* fueron usadas en los tres corregimientos (Fig. 2); estas especies se propagan de manera asexual, son de crecimiento rápido y pueden ser utilizadas para la alimentación animal. Además, constituyen fuentes de postes muertos (*G. sepium* y *D. robinoides*). Se presume que los agricultores las utilizan cuando la disponibilidad local de poste muerto de otras especies (alta resistencia y durabilidad) es escasa. La especie de mayor presencia por corregimiento fue *G. sepium* en Santa Marta y Santo Domingo y *D. robinoides*

en Sortová; la diferencia podría deberse a que en las dos primeras localidades los productores utilizan forraje arbóreo para la alimentación animal (especialmente en la época seca), mientras en Sortová la especie en referencia ha mostrado una mayor adaptación y los agricultores la prefieren para leña y para madera en construcciones rurales en las fincas.

La densidad lineal varió entre 856 y 1108 árboles km⁻¹ (espaciamiento de aproximadamente 1 m) y la riqueza de especies entre cuatro y seis, sin diferencia significativa entre los corregimientos. Esto se podría atribuir a la escasa disponibilidad de postes muertos de especies de alta durabilidad. La preferencia fue por árboles de uso múltiple (97%). Las especies representativas de cada grupo fueron *G. sepium* y *D. robinoides* para uso múltiple; *T. rosea* y *C. alliodora* como maderables, y *C. sinensis* y *Psidium guineensis* como frutales.

Volumen de madera (m³) en las cercas vivas

T. rosea fue la única especie maderable encontrada en las cercas vivas del corregimiento de Santa Marta, con un volumen total de 0,36 m³ km⁻¹ (Cuadro 4). En el corregimiento de Santo Domingo, se encontró un mayor volumen total de madera en las cercas vivas, con 1,24 m³, mientras que en Sortová no se encontraron árboles maderables en las cercas vivas. En Santo Domingo, en la categoría diamétrica comercial aprovechable (dap ≥35 cm), se identificaron las especies *D. robinoides* y *Pithecellobium saman*, con 0,53 y 0,50 m³ km⁻¹, respectivamente. Esto refleja que los ganaderos, como en la mayoría de fincas de Centroamérica, están subutilizando un espacio en la finca que tiene el potencial de ge-

Cuadro 4. Volumen de madera total y aprovechable de especies comerciales en cercas vivas en los corregimientos de Santa Marta y Santo Domingo, distrito de Bugaba, Chiriquí, Panamá

Especies en los corregimientos	Volumen de madera (m ³ km ⁻¹)		Total
	dap <35 cm	dap ≥35 cm	
Santa Marta			
<i>Tabebuia rosea</i>	0,36		
Subtotal	0,36		0,36
Santo Domingo			
<i>Diphysa robinoides</i>		0,53	
<i>Pithecolobium saman</i>		0,50	
<i>Tabebuia rosea</i>	0,21		
Subtotal	0,21	1,03	1,24

nerar productos maderables de calidad y en cantidad, tanto para la finca como para el mercado local. Además, el panorama incita a pensar en el diseño de estrategias, como establecer un plan de manejo de la regeneración natural o plantación de árboles (especies nativas), en el caso de que la primera sea escasa, e implementar el manejo silvicultural apropiado para alcanzar los productos maderables deseados.

Índice de Jaccard para cercas vivas

De acuerdo con el índice de Jaccard, la mayor similitud de especies se presentó entre los corregimientos de Santa Marta y Santo Domingo (0,53), porque ambos presentan condiciones biofísicas similares. Los productores manejan las mismas especies por medio de propagación de postes vivos dentro de la misma finca, o las compran a finqueros cercanos.

CONCLUSIONES

- Los árboles dispersos en potrero (estado fustal) más frecuentes en los corregimientos de Santa Marta, Santo Domingo y Sortová fueron *C. sinensis*, *T. rosea* y *D. robinoides*. Su importancia radica en que ofrecen frutos para la alimentación humana y animal, madera y postes, respectivamente.
- Las especies arbóreas en potrero no mostraron una distribución sucesional adecuada, ya que la proporción de brinzales que alcanzan el estadio de latizales es muy bajo (2,2%). Si no se implementan estrategias para mejorar la distribución de la sucesión vegetal, los árboles dispersos en potrero van a desaparecer.
- Los corregimientos de Santa Marta y Santo Domingo presentaron una mayor similitud entre las especies arbóreas existentes en potrero y en las cercas vivas, lo cual se atribuye a que ambos sitios tienen condiciones biofísicas similares (suelo, clima, topografía, precipitación pluvial y altura sobre el nivel del mar).
- Entre los árboles dispersos en potrero, la mayoría fueron frutales (40%) y maderables (35%), cuyas especies predominantes fueron *C. sinensis* y *T. rosea*, respectivamente. Las especies de uso múltiple fueron las más importantes en las cercas vivas (97%), repre-

sentadas por *G. sepium* y *D. robinoides*. Son especies adaptadas a la zona y rústicas ante el manejo imperante en las pasturas. Además, brindan madera, postes, sombra y alimento para el ganado y, en algunos casos, ingresos adicionales para el agricultor.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Camargo, JC; Ibrahim, M; Somarriba, E; Finegan, B; Current, D. 2000. Factores ecológicos y socioeconómicos que influyen en la regeneración natural de laurel en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo y subhúmedo de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 7(26):46-49.
- Casasola C, F. 2000. Productividad de los sistemas silvopastoriles tradicionales en Moropotenté, Estelí, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 95 p.
- Cruz, D. 2002. Productividad y sostenibilidad para la ganadería – II parte. Asociación Colombiana de Criadores de Ganado Cebú 324: 30-34.
- Holmann, F; Romero, F; Montenegro, J; Chana, C; Oviedo, E; Baños, A. 1992. Rentabilidad de sistemas silvopastoriles con pequeños productores de leche en Costa Rica: primera aproximación. *Turrialba* 42(1):79-89.
- IDIAF (Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá). 1991. Producción de forraje y composición química de la leguminosa *Gliricidia sepium* (Bala) en Bugaba, Santa Marta. *Revista Ciencia Agropecuaria* 7: 117-118.
- MacDicken, KG; Vergara, NT. 1990. Introduction to agroforestry. In MacDicken, KG; Vergara, NT. eds. *Agroforestry. Classification and management*. New York, US, John Wiley and Sons. p. 1-30.
- Magurran, AE. 1989. *Ecological diversity and its measurement*. Trad. AM Cirer. Barcelona, ES, Ediciones Vedral. 198 p.
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. *Mensura Forestal GTZ/IICA*. San José, CR. 561 p. (Serie investigación y educación en desarrollo sostenible N°97-01).
- Rodríguez, I; Crespo, G; Fraga, S. 2001. Impacto de los árboles en los suelos ganaderos. In Simposio Internacional sobre ganadería Agroecológica (SIGA) (1, 2001). Memorias. La Habana, CU. 188 p.
- Souza de Abreu, MH. 2002. Contribution of trees to the control of heat stress in dairy cows and the financial viability of livestock farms in humid tropics. Ph. D. Thesis. Turrialba, CR, CATIE. 150 p.
- Villafuerte Z, LE. 1998. Sistemas expertos como herramienta para toma de decisiones de manejo en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo bajo de Costa Rica. Tesis Mag. Sci. Turrialba, CR, CATIE. 98 p.

Avances de Investigación

Caracterización del sistema agroforestal maíz con árboles dispersos en la cuenca del Río Carrizal, Manabí, Ecuador¹

Ricardo Limongi Andrade²; Celia A. Harvey³; Francisco Jiménez³; Tamara Benjamin³

Palabras claves: diversidad de especies; regeneración natural, usos y manejo del componente arbóreo; *Zea mays*.

RESUMEN

Se caracterizó el sistema agroforestal de maíz con árboles dispersos en la Cuenca del Río Carrizal, Manabí, Ecuador, el cual presenta bajas densidades de árboles (11 árboles ha⁻¹), con una baja cobertura arbórea (3,5 % del área de la parcela), baja área basal (0,6 m² ha⁻¹) y pocas especies por parcela (6,5 ± 2,7). Aunque se encontró un total de 58 especies arbóreas en las fincas, el sistema está dominado por seis especies arbóreas nativas (*Guazuma ulmifolia*, *Prosopis pallida*, *Prosopis affinis*, *Cordia alliodora*, *Albizia guachapele* y *Leucaena trichodes*), que representan el 72% del total de individuos con dap > 5 cm. El 62% de los árboles muestreados eran manejados por podas y desrames. Las especies usadas para leña, alimento para ganado y que poseen copas densas fueron manejadas con podas, mientras que aquellas especies útiles para madera o construcciones rurales, o con copas ralas, fueron desramadas. Los productores mencionaron 11 aspectos positivos de tener árboles en sus parcelas, incluyendo la producción de madera (68% de los productores), leña (60%), alimento para ganado (24%), sombra para personas (28%) y animales (23%). Además, señalaron que los árboles dispersos ofrecen limitantes para la producción de maíz porque compiten con este por agua y luz. Mencionaron 10 especies arbóreas que son buenas para combinar con maíz, de las cuales las principales fueron *C. alliodora*, *A. guachapele* y *Prosopis* spp.

Characterization of the agroforestry system of dispersed trees in corn fields in the Río Carrizal watershed, Manabí, Ecuador

Key words: natural regeneration; species diversity; tree use and management; *Zea mays*.

ABSTRACT

An agroforestry system of dispersed trees in corn fields was characterized in the Río Carrizal watershed, in Manabí, Ecuador. Low tree densities (11 trees ha⁻¹), little tree cover (3.5% of field area), small basal area (0.6 m² ha⁻¹) and few tree species per field (6.5 ± 2.7) were observed. Although a total of 58 tree species were found in the farms, the system was dominated by six native tree species (*Guazuma ulmifolia*, *Prosopis pallida*, *Prosopis affinis*, *Cordia alliodora*, *Albizia guachapele* and *Leucaena trichodes*), which represented 72% of the individuals with dap > 5 cm. Sixty-two percent of the trees sampled were managed by pollarding and pruning. Tree species used for firewood or livestock fodder, or that have dense canopies, were managed by pollarding, whereas species used for timber or rural construction, or that had thin canopies, were managed by pruning. Farmers mentioned 11 positive aspects of having trees in their fields, including timber production (68% of the farmers), firewood production (60%), fodder for livestock (24%), and shade for people (28%) and animals (23%). The main drawback of the dispersed trees, recognized by farmers, is that they compete with the corn for water and light. The producers mentioned 10 tree species that are suitable for combining with corn production, of which the most frequently mentioned were *C. alliodora*, *A. guachapele* and *Prosopis* spp.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades de los pequeños y medianos agricultores en América Latina es la producción de granos básicos, especialmente maíz (*Zea mays*), en áreas pequeñas para satisfacer sus requerimientos de carbohidratos y proteínas (Leakey y Sánchez 1997). En algunas zonas, los productores cultivan el maíz en combinación con árboles dispersos. Estos árboles pueden

servir como fuente de madera, leña y forraje, para reducir la erosión y aumentar la fertilidad del suelo a través de sus aportes de materia orgánica, lo cual también contribuye a aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, y son importantes para la conservación de muchas especies vegetales y animales (Martínez 1989, Harvey y Haber 2000, Schroth y Sinclair 2003).

¹ Basado en: Limongi A, JRF. 2002. Caracterización del sistema agroforestal "maíz con árboles dispersos" en la cuenca del Río Carrizal, Manabí, Ecuador. Tesis Mag.Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2002. Correo electrónico: rlimongi2002@yahoo.com (autor para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: charvey@catie.ac.cr; fjimenez@catie.ac.cr; tamara@catie.ac.cr

En Manabí, Ecuador, se cultiva el maíz durante la época lluviosa, bajo condiciones de cero labranza. En estas parcelas de maíz existe una variedad de especies arbóreas con diferentes usos, las cuales pueden estar distribuidas o agrupadas y con densidades muy variables. A pesar de que este sistema agroforestal de maíz con árboles dispersos (SAFMAD) es común, existe poca información documentada sobre las especies de árboles presentes, su abundancia, procedencia y manejo, y las razones por las cuales los agricultores no talan estos árboles.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) caracterizar la riqueza, abundancia, diversidad y composición de los árboles en el SAFMAD en la cuenca del Río Carrizal, en Manabí, Ecuador; 2) describir el manejo y uso de los árboles que se encuentran dispersos en SAFMAD; y 3) evaluar las percepciones de los productores de este sistema agroforestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó de enero a junio de 2001 en la cuenca del Río Carrizal, Manabí, cantones de Junín y Tosagua (0°40' a 0°58'S y 80°07' a 80°20'O; ppt 825,4 mm año⁻¹; 25,7 °C promedio anual). Predominan las áreas con laderas y elevaciones alrededor de los 800 msnm (PIACCH 1996). Se seleccionaron ocho comunidades que poseían el SAFMAD, con base en la predominancia de productores de maíz y la presencia del sistema agroforestal en sus fincas. Entre las ocho comunidades se seleccionó un total de 54 fincas al azar. El número de fincas por comunidad fue proporcional al número de productores.

Para caracterizar la riqueza, abundancia, diversidad y composición del componente arbóreo se seleccionó al azar una parcela de maíz en cada finca, en la cual se registraron todos los árboles presentes con dap > 5 cm. Las parcelas estudiadas varían en tamaño (promedio de 2,5 ± 1,9 ha; área total muestreada de 137,8 ha). Además, en cada parcela se estableció una subparcela (de 50 x 50 m), donde se contó el número de árboles por especie con dap < 5 cm. Asimismo, en cada finca se realizó una encuesta agrosocioeconómica semiestructurada para documentar cómo los productores manejan y perciben su sistema agroforestal, cuáles especies utilizan en el sistema, cómo seleccionan los árboles, y cuáles factores influyen en su manejo del sistema agroforestal. Los datos de la riqueza, abundancia y diversidad de árboles fueron analizados con estadísticas descriptivas, prueba de pseudo *T*, χ^2 , ANDEVAS y pruebas de Duncan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de las fincas maiceras y el sistema de producción

Las fincas tuvieron un área promedio de 12,5 (± 10,1 ha). En promedio, el 47% (5,9 ha) de la superficie estaba dedicado al cultivo de maíz con árboles dispersos. Otros usos del suelo por finca fueron pastos (2,4 ha), rastrojal (2,3 ha) y bosque secundario (0,3 ha). El resto del suelo (promedio de 0,7 ha finca⁻¹) estuvo ocupado por otros cultivos anuales, como *Arachis hipogaea*, *Oriza sativa*, *Manihot esculenta* y musáceas, sembrados en monocultivos en pequeñas áreas.

La mayoría de los productores cultivan la parcela de maíz durante cinco a seis años seguidos; después la dejan en descanso por dos años (charral o bajillal) para ser sembrada de nuevo con maíz (Fig. 1). La mayoría de los árboles se establecen durante la fase de charral; cuando el charral es eliminado, los productores seleccionan (y retienen) aquellas especies arbóreas que son de su interés, pero en bajas densidades. Algunas especies también se establecen durante la siembra del cultivo por medio de la dispersión de semillas a través del ganado, aves o viento. Durante la producción del cultivo, los productores manejan los árboles eliminando las copas o ramas bajas. Sin embargo, las especies que no son útiles (y también algunas que sí lo son) son eliminadas durante el manejo del cultivo, la limpieza de la parcela, el ingreso del ganado o la quema. Los productores eliminan los residuos de la cosecha alrededor de los árboles de su interés para evitar que sean quemados.

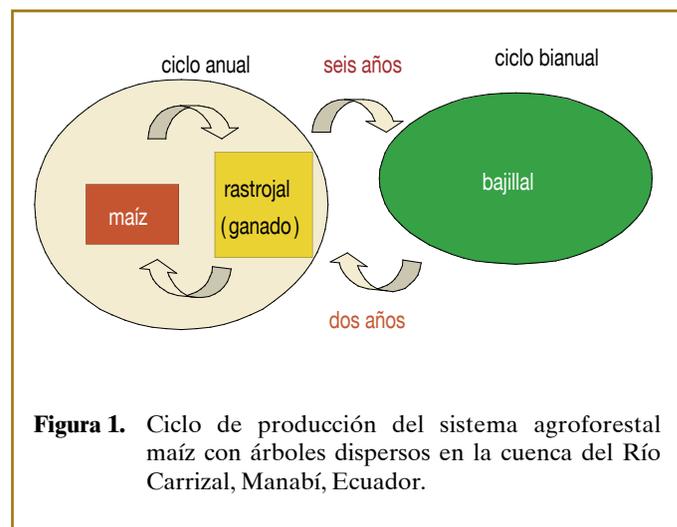


Figura 1. Ciclo de producción del sistema agroforestal maíz con árboles dispersos en la cuenca del Río Carrizal, Manabí, Ecuador.

El manejo del SAFMAD consistió básicamente de ocho actividades: dos de acondicionamiento del lote de maíz por sembrar (ingreso de ganado y roza, amontona y que-

ma de rastrojo); cinco relacionadas con el manejo del maíz (siembra, manejo de malezas, manejo de insectos plagas, fertilización y cosecha); y una dirigida hacia los árboles (poda y desrame).

Composición y manejo de los árboles dispersos

Se encontró un total de 1219 árboles con $dap > 5$ cm, distribuidos en 58 especies en 137,8 ha de maíz. La densidad arbórea promedio fue de 11,3 individuos ha^{-1} (rango 2 a 80 árboles ha^{-1}). El porcentaje de cobertura arbórea por parcela fue de 3,5% en promedio, con un área basal promedio de 0,6 $m^2 ha^{-1}$.

El sistema agroforestal fue dominando por seis especies de uso múltiple, que representaron el 72% de los árboles encontrados (Cuadro 1). Esta dominancia de árboles de uso múltiple se debe a que la mayoría de los productores están interesados en aquellas especies que proveen madera para la venta (68%), leña para autoconsumo (60%) y alimento para el ganado (24%). Otros criterios de selección son rápido crecimiento, calidad de la madera y compatibilidad con el cultivo. Las especies utilizadas para leña reciben un manejo más frecuente, con podas y desramas y, generalmente, presentan alturas de 1-3 m; en cambio, los árboles maderables generalmente no son intervenidos y alcanzan alturas mayores.

Las especies no maderables que no permiten el paso de mucha luz, como *Guazuma ulmifolia* (4,6 m \pm 2,8) y *Leucaena trichodes* (5,5 m \pm 2,6), son mantenidas a bajas alturas por los productores, mientras que a las especies con copas ralas, preferidas por los productores (*Cordia*

alliodora, *Prosopis pallida*, *Prosopis affinis*, *Albizia guachapele* y *Muntingia calabura*), se les permite crecer más alto.

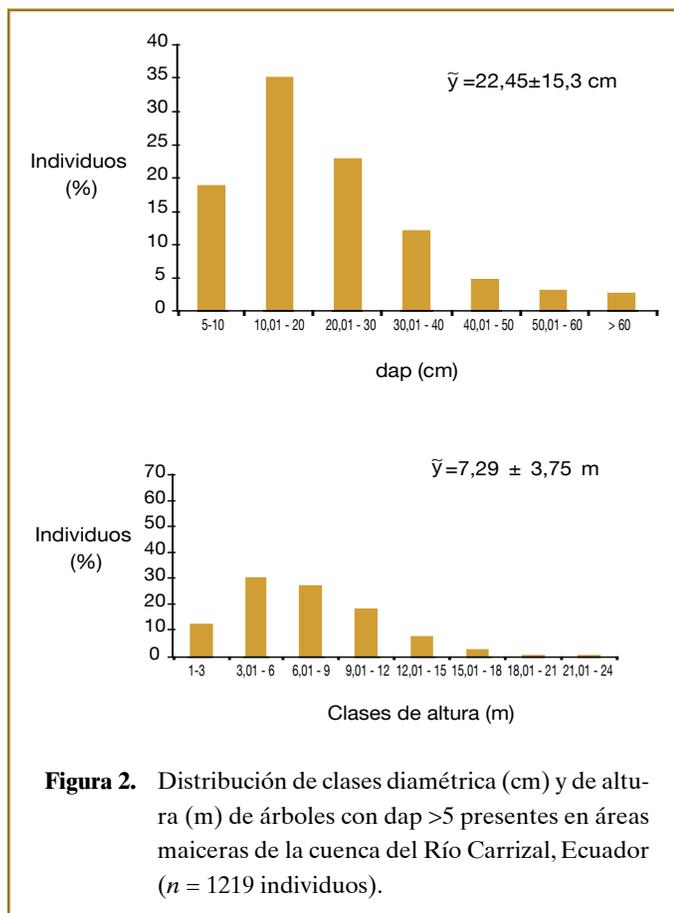
La regeneración natural

La mayoría de los árboles con $dap > 5$ cm eran pequeños, el 89% tenía diámetros < 40 cm, y el 43% de los árboles tenían alturas < 6 m. Si se incluyen los latizales (2644 latizales bajos y 2557 latizales), el porcentaje de árboles con alturas < 6 m alcanza el 70% (Fig. 2). En las parcelas de maíz hubo buena capacidad de regeneración natural de árboles, aunque esta varió mucho entre parcelas. En promedio, hubo 197 ± 255 árboles $ha^{-1} < 50$ cm de altura y 191 ± 208 árboles ha^{-1} con altura > 50 cm y $dap < 5$ cm. Se encontró un total de 46 especies en estas dos categorías. Las especies con mayor regeneración (> 50 cm de altura) fueron *Prosopis* spp., *G. ulmifolia*, *Machaerium millei*, *Cordia lutea* y *L. trichodes*.

Además de factores exógenos como el suelo, clima y agentes bióticos (herbívoros, enfermedades) que afectan el vigor y establecimiento de los árboles, la regeneración depende del manejo y uso de la parcela, especialmente quemas, uso de herbicidas, deshierbas con machete, uso del suelo e ingreso de ganado. La permanencia de cada especie dependerá también de los usos y beneficios que proporcione al productor. La regeneración natural puede ser influenciada por el ingreso de ganado a la parcela, donde puede consumir los frutos y diseminar las semillas de especies como *G. ulmifolia* y *Prosopis* spp.

Cuadro 1. Especies más comunes y sus principales usos en el sistema agroforestal maíz con árboles dispersos en la cuenca del Río Carrizal, Manabí, Ecuador

Nombre		Familia	Frecuencia (%)	Principales usos		
Científico	Común			Madera	Leña	Alimento para ganado
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Guasmo	Sterculiaceae	22	—	✓	✓
<i>Prosopis pallida</i>	Algarrobo amarillo	Mimosaceae	20	—	✓	✓
<i>Prosopis affinis</i>	Algarrobo negro	Mimosaceae	10	—	✓	✓
<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	Boraginaceae	8	✓	✓	—
<i>Albizia guachapele</i>	Guachapelí prieto	Mimosaceae	7	✓	✓	—
<i>Leucaena trichodes</i>	Pela caballo	Mimosaceae	5	—	✓	✓



Algunas especies presentes en la regeneración natural, como *Acacia farnesiana*, *Acrocomia* sp., *Coccoloba* sp., *Croton fraseri*, *Gallesia integrifolia*, *Grias lecythis*, *Mauria heterophylla*, *Pithecellobium dulce*, *Poulsenia armata*, *Rauvolfia littoralis* y *Trema micrantha*, no se encontraban en el sistema agroforestal como adultas, indicando quizás que los productores eliminan algunas especies cuando son pequeñas o que estas no pueden crecer en las condiciones de la parcela. Su presencia como plántulas probablemente se debe a la cercanía de bosques secundarios, cercas vivas o los bajillales desde donde procede la lluvia de semilla, ya sea dispersada por el viento o por frugívoros (Martínez 1995, Guariguata 1999). La alta densidad de árboles de regeneración natural, comparada con la baja densidad de árboles adultos, sugiere que el manejo actual de las fincas disminuye el componente arbóreo en las parcelas.

Percepciones de los productores del sistema agroforestal maíz con árboles dispersos

La mayoría de los productores afirma que los árboles dispersos ofrecen tanto beneficios como limitantes para la producción de maíz. En total, enumeraron 11 aspectos positivos de tener árboles en fincas maiceras.

Las ventajas más mencionadas fueron la producción de madera, la provisión de sombra para los productores, la producción de leña y la provisión de sombra para los animales (Cuadro 2). Los productos de los árboles dispersos ayudan a los productores a cubrir sus necesidades económicas y tener suficiente leña y madera para el consumo propio. Las mayores desventajas mencionadas fueron que el maíz se queda pequeño cerca del árbol y que se produce competencia por agua.

Según los productores, hay algunas especies de árboles más compatibles con la producción de maíz que otras. Aunque no siempre hubo consenso entre los productores sobre cada especie, la preferida fue *Prosopis* spp., seguida por *C. alliodora* y *A. guachapele*. La preferencia por estas especies se debe a que requieren poco manejo; por ser especies deciduas, compiten poco con el maíz por luz durante el desarrollo del cultivo; brindan madera de buena calidad para aserrío y construcciones rurales; proporcionan carbón y leña de buena calidad y, con excepción de *C. alliodora*, forraje. En cambio, hay otras 26 especies arbóreas que los productores señalan como incompatibles con el maíz (las de mayores restricciones incluyen *G. ulmifolia*, *L. trichodes*, *Centrolobium paraense* y *Caesalpinia* spp.) porque arrojan una sombra excesiva sobre el cultivo, resecan el suelo, reducen el rendimiento del maíz y crecen muy rápidamente. Otras especies exóticas y promisorias están comenzando a aparecer en los campos de cultivos de maíz (p. ej., *Schizolobium parahyba*), introducidas recientemente a la zona por productores y ONG.

Para estimular a los productores a aumentar la densidad de los árboles dispersos en las parcelas, es importante determinar las densidades y espaciamientos (arreglos) óptimos entre árboles y cultivo para minimizar la competencia entre ambos componentes por agua, luz, espacio y nutrientes. Además, urge evaluar el potencial de regeneración natural que tiene cada especie arbórea y la posibilidad de manejar la regeneración natural como un mecanismo para aumentar la densidad de árboles.

Comparación con otros SAF con maíz

Aunque el SAFMAD parece existir en otras regiones de América Latina, hay poca información al respecto. Hubo estudios en El Salvador (García *et al.* 2001) y en Honduras (Hellin *et al.* 1999). En El Salvador, los productores producen granos básicos en pequeñas áreas (< 5 ha) y retienen árboles dispersos con densidades de

Cuadro 2. Aspectos positivos y negativos de los árboles dispersos dentro del cultivo de maíz según opinión de los productores ($n = 53$)

Aspectos positivos ⁽²⁾	% del total de productores	Aspectos negativos	% del total de productores
Provisión de servicios			
Sombra a personas	28,3	Ninguno	39,6
Sombra a animales	22,6	Planta pequeña cerca del árbol	30,1
Poca competencia	15,0	Competencia por agua	22,6
Mejoran el ambiente	13,2	Pierde espacio	5,6
Abonan el suelo	9,4	Hospedera de insectos plagas	1,8
Evitan la erosión del suelo	7,5		
Protección del viento	5,6		
Provisión de productos			
Producción de madera	67,9		
Producción de leña	60,3		
Alimento de ganado	24,5		
Producción de frutas	1,8		

⁽²⁾ Los porcentajes no suman 100% porque los productores informaban más de un aspecto positivo.

50 a 630 árboles ha^{-1} (promedio de 5,6 especies arbóreas en 0,1 ha). Este sistema es dominado por la presencia de un maderable, *C. alliodora* (promedio de 86 árboles ha^{-1}). En Honduras, los productores producen granos básicos en un sistema denominado “quezungual”, en el cual mantienen una alta densidad de árboles (promedio de 419 árboles ha^{-1}), dominados por frutales (como *Byrsonima crassifolia* y *Psidium guajava*) y maderables (como *C. alliodora*, *Diphysa robinoides* y *Swietenia* spp.). Estos productores podan los árboles a 1,5 m y utilizan su biomasa para la conservación de suelo, mantenimiento de fertilidad y manejo de humedad (Hellin *et al.* 1999).

Existen muchas similitudes entre el SAFMAD de Ecuador con los sistemas en El Salvador y Honduras: todos tienen árboles que proceden de la regeneración natural; todos se caracterizan por tener pocas especies; todos incluyen a *C. alliodora*; y todos son dominados por especies que generan productos como madera, leña o frutos. Sin embargo, el SAFMAD en Ecuador tuvo densidades de árboles (11 árboles ha^{-1}) mucho más bajas que los encontrados en El Salvador (192 árboles ha^{-1}) y Honduras (419 árboles ha^{-1}). Otra diferencia es

que los árboles en Ecuador son manejados para reducir la competencia con el maíz y los productores queman los residuos de la cosecha antes de la siembra, mientras que en El Salvador y Honduras podan los árboles para incorporar biomasa al suelo y no queman sus parcelas.

CONCLUSIONES

- En Manabí, Ecuador, el SAFMAD se caracteriza por tener bajas densidades de árboles y pocas especies por parcela, lo cual refleja que los productores están manejando los árboles en función de minimizar la competencia con el cultivo del maíz.
- Aunque se encontró un total de 58 especies arbóreas, la mayoría de los árboles pertenecieron a seis especies (*A. guachapele*, *C. alliodora*, *G. ulmifolia*, *L. trichodes*, *P. pallida* y *P. affinis*), que representan el 72% del total de individuos con $dap > 5$ cm. La mayoría de los árboles son de regeneración natural y se establecen principalmente durante la fase de charral.
- Los productores manejan las densidades de árboles y someten los árboles a podas intensas o desrames. Seleccionan cuáles especies arbóreas son retenidas y en qué densidades. Tienden a retener especies que

tienen importancia como fuente de madera, leña, construcciones rurales, forraje para ganado y por su compatibilidad con el cultivo.

- Los productores reconocen el valor de los árboles en sus fincas, y las ventajas y desventajas de combinar árboles con el maíz; además, conocen cuáles especies son más compatibles con el maíz y cuáles son menos compatibles.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el PROMSA (Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios), la UEFC (Unidad Ejecutora de Fondos Competitivos) y el NRI (National Resources International).

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Guariguata, M. 1999. Biología de semillas y plántulas de nueve especies arbóreas comunes en bosques secundarios de bajura en Costa Rica; implicaciones en el manejo forestal basado en la regeneración natural. CATIE, UMBT, ST-IT 309. Publicación No 16. 17 p.

Harvey, C; Haber, WA. 1999. Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. *Agroforestry Systems* 44: 37-68.

Hellin, J; Welchez, LA; Cherrett, I. 1999. The Quezungal System: an indigenous agroforestry system from Western Honduras. *Agroforestry Systems* 46:229-237.

Leakey, RB; Sánchez, PA. 1997. ¿How many people use agroforestry products? *Agroforestry Today* 9(3): 4-5.

Martínez, H. 1989. El componente forestal en los sistemas de finca de pequeños agricultores. Serie Técnica de CATIE. CATIE, Turrialba, Costa Rica. No. 19, 79 p.

Martínez, M. 1995. Regeneración natural y diversidad de especies arbóreas en selvas húmedas. Centro de Ecología, UNAM, México. p. 27-79.

PIACCH (Proyecto Integral Agrícola Carrizal Chone, EC). 1996. Diagnóstico Agrosocioeconómico del Proyecto Integral Agrícola Carrizal Chone. CRM-INIAP-GTZ. Manabí, Ecuador. 85 p.

Schroth, G; Sinclair, FL. 2003. Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods. CABI Publishing. 437 p.

Avances de Investigación

Incidencia de la broca (*Hypothenemus hampei*) en plantas de café a pleno sol y bajo sombra de *Eugenia jambos* y *Gliricidia sepium* en San Marcos, Nicaragua¹

Domingo Félix Matos²; Falguni Guharay³; John Beer⁴

Palabras claves: *Coffea arabica*; fenología; humedad; manejo integrado de plagas; producción; temperatura.

RESUMEN

Se estudió el microclima, la fenología del café (*Coffea arabica*) y la incidencia de la broca (*Hypothenemus hampei*) del café bajo tres tipos de sombra: densa, de manzana rosa (*Eugenia jambos*, 60-70%), media, de madero negro (*Gliricidia sepium*, 40-50%) y pleno sol (0% cobertura) en cafetales de la meseta de Carazo, San Marcos, Nicaragua. Una mayor incidencia de luz solar causó reducción de la humedad relativa del aire por debajo de 70% en las horas de la tarde en las plantaciones de café a pleno sol y bajo la sombra de madero negro. Las plantas a pleno sol produjeron mayor cantidad de granos maduros, y el café bajo la sombra densa de manzana rosa presentó una mayor incidencia de la broca (17-25% de frutos), pero entre la sombra de madero negro y a pleno sol no hubo diferencias (incidencia < 2%). En cambio, las poblaciones de la broca en los frutos en el suelo no variaron entre los diferentes tipos de sombra. Los resultados sugieren que para las condiciones del Pacífico de Nicaragua, una cobertura de dosel de 40-50% provee mejores condiciones para el manejo de la broca del café en sistemas agroforestales.

Incidence of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in coffee plants under different shade types in San Marcos, Nicaragua

Key words: *Coffea arabica*; humidity; integrated pest management; phenology; production; temperature.

ABSTRACT

The incidence of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) was studied under three shade types: dense shade of *Eugenia jambos* (60-70% canopy cover), moderate shade of *Gliricidia sepium* (40-50% cover) and full sun (0% cover) in coffee (*Coffea arabica*) plantations in Carazo, San Marcos, Nicaragua. Higher insolation caused a reduction of relative air humidity below 70% in the afternoon in the coffee plantations in full sun and under the shade of *G. sepium*. Coffee plants in full sun produced more coffee. Coffee under the dense shade of *E. jambos* had a higher incidence of borer (17-25% of fruits); under *G. sepium* shade and in full sun there was no difference (incidence < 2%). On the other hand, borer populations in fallen coffee fruits didn't vary among the different shade types. The results suggest that a shade canopy of 40-50% provides better conditions for controlling the coffee berry borer in agroforestry systems in the Pacific area of Nicaragua.

INTRODUCCIÓN

El 17% del café (*Coffea arabica*) de Nicaragua se cultiva en la meseta cafetalera de Carazo, en la vertiente del Pacífico. La broca (*Hypothenemus hampei*) apareció en este país en 1988, dispersándose rápidamente, y hoy en día es la plaga de mayor importancia económica en

la caficultura nacional (Guharay *et al.* 2000). Las larvas de la broca se alimentan de frutos tiernos y maduros, provocando la pérdida del grano (Sousa y Reis 1980, Ochoa *et al.* 1990). La sombra regulada puede ayudar a mantener niveles bajos de plagas; por ejemplo, la som-

¹ Basado en Félix, MD. 2002. Incidencia y poblaciones de broca (*Hypothenemus hampei*) en árboles de café y tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

³ Profesor-Investigador, CATIE, Managua, Nicaragua. Correo electrónico: emergem@mipafcatie.org.ni

⁴ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: jbeer@catie.ac.cr

bra y la alta humedad atmosférica pueden favorecer ciertos enemigos naturales de la broca. Sin embargo, los microorganismos entomopatógenos y parasitoides necesitan de suficiente luz para reproducirse y reprimir la plaga (Guharay *et al.* 2001). En tal sentido, la respuesta de la broca a la sombra es variable y no hay una tendencia clara sobre el efecto de la radiación o la humedad (Guharay *et al.* 2000).

En este artículo se evalúan tres tipos de sombra sobre: (i) el microclima (temperatura y humedad relativa del aire); (ii) la fenología del café (desarrollo de hojas y frutos); y (iii) la incidencia de la broca durante las distintas etapas fenológicas de la producción del café.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó entre marzo y septiembre del 2002, en una finca de la Empresa Inversiones Generales S.A., San Marcos (Carazo), Nicaragua (11°55'N y 83°12'O, 570 msnm). La precipitación anual varía entre 1000 y 1400 mm, con un período seco bien marcado de noviembre a mayo. La temperatura media anual es de 23,7 °C, con máxima de 30,1 °C y mínima de 18,0 °C. La humedad relativa del aire es de 82,6% y la velocidad promedio del viento de 3,2 m s⁻¹ durante siete meses del año. Los suelos son de origen volcánico, profundos, moderadamente planos, francos arenosos, con buen drenaje, pH entre 5 y 6, ricos en K y materia orgánica, pero bajos en P (Guharay *et al.* 2000).

Las pérdidas de producción debidas a la broca en los últimos 10 años en el sitio de estudio variaron entre el 2 y el 50%, a pesar de la aplicación de pesticidas⁵. Los cafetos (Caturra y Catuaí amarillo), plantados a 2,10 m entre hileras y 1,05 m entre plantas (4500 plantas ha⁻¹), se receparon cada tres o cuatro años y se fertilizaron con dos aplicaciones por año: 1) 60 kg ha⁻¹ de urea (46% N) y 25 kg ha⁻¹ de MOP (muriato de potasio) combinado con la fórmula 15-15-20, aplicando 70, 70 y 93 kg ha⁻¹ de N, P y K en los meses de noviembre-mayo; y 2) 58 kg ha⁻¹ de urea y 24 kg ha⁻¹ de MOP combinado con la fórmula 30-0-20, aplicando 90 y 60 kg ha⁻¹ de N y K en los meses de julio-agosto. Las especies de árboles predominantes fueron madero negro (*Gliricidia sepium*) y manzana rosa (*Eugenia jambos*). Los árboles de *G. sepium* fueron establecidos dentro de las hileras de café a una distancia de 8,5 x 8,5 m, alcanzando una altura de 8 m. *E. jambos* se estableció como cortina rompevientos a 2 m lineales uno de otro, alcanzando una altura promedio de 6 m. Se seleccionó un total de 12 parcelas de estudio en tres

lotes diferentes de la finca, utilizando los siguientes criterios: infestación por broca en frutos en el suelo y ausencia de recolección de los frutos del suelo (pepena). Cada lote incluyó los tres tratamientos; es decir, las diferentes coberturas de sombra (pleno sol, sombra de *G. sepium*, sombra de *E. jambos*). Se empleó un diseño de bloques completos al azar con tres réplicas (los lotes) y tres tratamientos (los tipos de sombra), pero se incluyó una replicación parcial de los tratamientos dentro de cada bloque, para un total de 12 parcelas experimentales. Las parcelas con *G. sepium* y a pleno sol fueron de aproximadamente 2500 m² (50 x 50 m), con un espacio útil (central) de 35 m² (8,4 x 4,2 m), formado por 16 cafetos distribuidos en cuatro hileras, dejando 98% del área como borde para evitar el efecto de fumigación contra brocas en parcelas adyacentes. Las parcelas con *E. jambos* también fueron de 2500 m² y con mediciones de 16 cafetos, pero estuvieron ubicadas en los bordes del lote, junto a las cortinas rompevientos. Cada parcela incluyó 25 árboles de *E. jambos* en una línea; los bordes fueron de cuatro árboles en cada extremo.

Los factores ambientales medidos en el centro de cada parcela experimental, entre marzo y septiembre de 2002, fueron la temperatura (°C) y la humedad relativa del aire (%), haciendo registros diarios a 60 cm sobre el nivel del suelo con un termohigrómetro portátil entre las 6:00 y 7:00 y entre las 13:00 y 14:00. La precipitación diaria fue medida en una estación meteorológica de la finca. La sombra (porcentaje de cobertura) en cada parcela se estimó mensualmente encima de las copas de los cafetos, promediando las lecturas de un densiómetro esférico, evaluando en cuatro puntos de la parcela.

El censo exhaustivo de los estados fisiológicos de cada cafeto se hizo de forma secuencial, en un movimiento helicoidal que partió de la parte apical hasta la base de la planta en el sentido de las manecillas del reloj. El número de hojas se contabilizó hasta la bandola número 60 de los 16 cafetos de cada parcela útil. Se hicieron siete conteos (cada mes; de marzo a septiembre). Se evaluaron las tres floraciones ocurridas en los meses de marzo, abril y mayo. El número de glomérulos y frutos totales en las primeras 60 bandolas se contabilizó partiendo desde el eje principal de la planta hasta los extremos de las bandolas, excluyendo los frutos secos o marchitos de la cosecha anterior. Se consideró como un glomérulo a los nudos que presentaron al menos un fruto. También se muestrearon la posición y el número de glomérulos infestados por broca.

⁵ Quiñónez, G. 2002. Encargado de la finca, San Marcos, Nicaragua. (Comunicación personal).

El recuento de los diferentes estados de la broca en los granos de café, tanto en la planta como caídos al suelo, se hizo cada 21 días, entre marzo y septiembre del 2002. En cada parcela y cada fecha de muestreo, se recolectaron 10 frutos con broca de los cafetos, así como 10 frutos con broca recolectados del suelo, envolviéndolos en un papel secante para evitar la proliferación de hongos saprofitos por efecto de la transpiración de los frutos antes de su evaluación en laboratorio. El primer muestreo de frutos en el suelo fue tomado a la par de la primera planta en cada parcela útil y las tres siguientes plantas de la línea, utilizando un marco de 0,25 x 0,25 m colocado al lado derecho, bajo el dosel de la planta. El siguiente muestreo se inició en la planta siguiente, para no volver a medir los mismos sitios. Para el quinto muestreo y los siguientes, el marco se lanzó en la parte izquierda del dosel de las plantas para que no coincidiera con los muestreos anteriores. En el laboratorio, se registraron los diferentes estados de la broca y la presencia de sus enemigos naturales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentaje de sombra y el microclima

La cobertura del dosel de sombra fue de 60-70% para *E. jambos*, 40-50% para *G. sepium*, y 0% a pleno sol (Cuadro 1). En las parcelas sombreadas hubo un pequeño aumento en el nivel de sombra durante la estación lluviosa. En las mañanas, la temperatura y humedad relativa fueron iguales en los tres tipos de sombra; sin embargo, en las tardes la temperatura del aire en las calles del cafetal a pleno sol fue mayor que en los cafetales bajo sombra. Lo contrario ocurrió con la humedad relativa, confirmando lo reportado por Castro *et al.* (1961) y Alonso (1985) (Figs. 1 y 2).

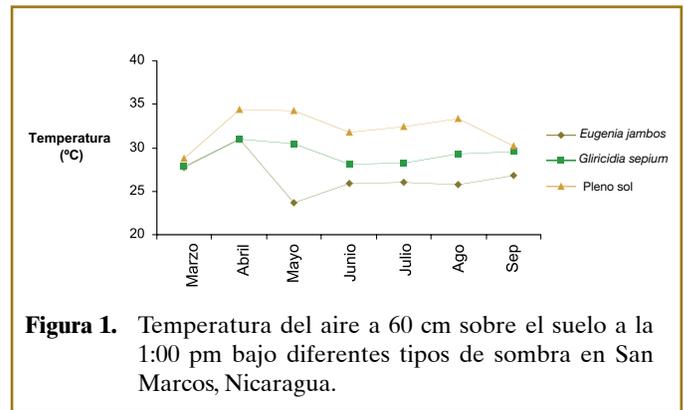


Figura 1. Temperatura del aire a 60 cm sobre el suelo a la 1:00 pm bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

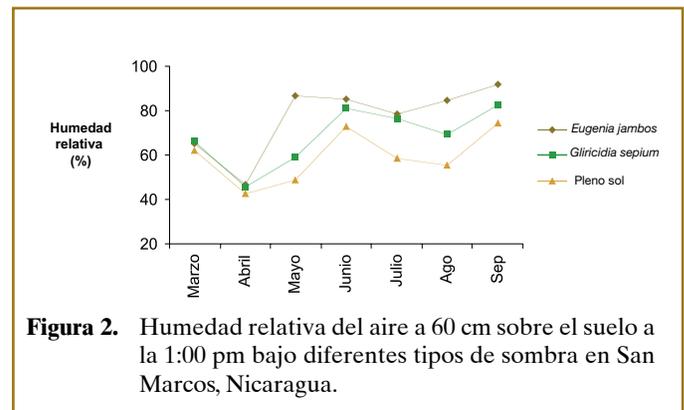


Figura 2. Humedad relativa del aire a 60 cm sobre el suelo a la 1:00 pm bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

Fenología del café

El número de hojas en los cafetos bajo *G. sepium* fue mayor que en las plantaciones bajo *E. jambos* y a pleno sol (Fig. 3). Sin embargo, los glomérulos y frutos totales parecieron estar estimulados por una mayor incidencia de luz solar y temperaturas más altas en las parcelas a pleno sol (Fig. 4). Renna *et al.* (1994) encontraron que las bandolas de las plantas a pleno sol crecieron más que en plantas bajo sombra, lo cual conlleva una mayor producción de flores.

Cuadro 1. Cobertura del dosel (porcentaje promedio \pm error estándar) sobre los cafetos bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua

Tipos de sombra	Época						
	Seca			Lluviosa			
	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre
Densa:							
<i>Eugenia jambos</i>	60 \pm 0,0 ^b	60 \pm 0,0 ^b	63 \pm 0,0 ^b	64 \pm 0,0 ^b	66 \pm 0,0 ^b	69 \pm 0,0 ^b	68 \pm 0,0 ^b
Media:							
<i>Gliricidia sepium</i>	41 \pm 0,5 ^a	44 \pm 0,9 ^a	44 \pm 1,0 ^a	44 \pm 0,8 ^a	46 \pm 0,5 ^a	48 \pm 1,9 ^a	49 \pm 0,4 ^a

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,001$ según prueba de Student-Newman-Keuls y Tukey).

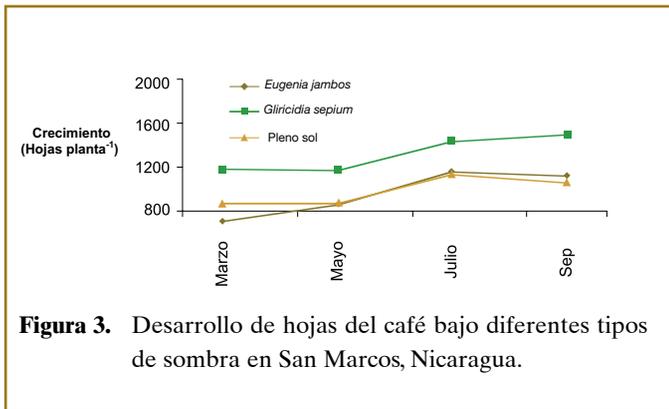


Figura 3. Desarrollo de hojas del café bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

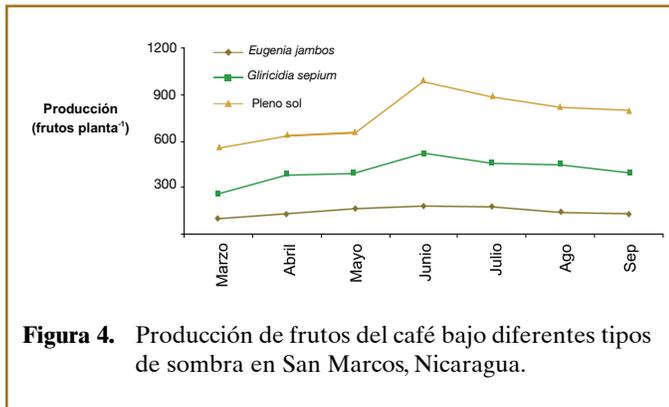


Figura 4. Producción de frutos del café bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

Población e incidencia de broca en frutos caídos

No hubo una diferencia significativa en la población total de la broca bajo los diferentes tipos de sombra (número de frutos por % de brocados); sin embargo, en los meses de junio y julio, el porcentaje de frutos en el suelo con broca fue mayor bajo sombra de *E. jambos*, lo cual podría ser resultado de diferentes condiciones microambientales, pero también debido a que hubo muchos menos frutos en el suelo y en las plantas (Feliz 2002) bajo la sombra de este árbol (Fig. 5).

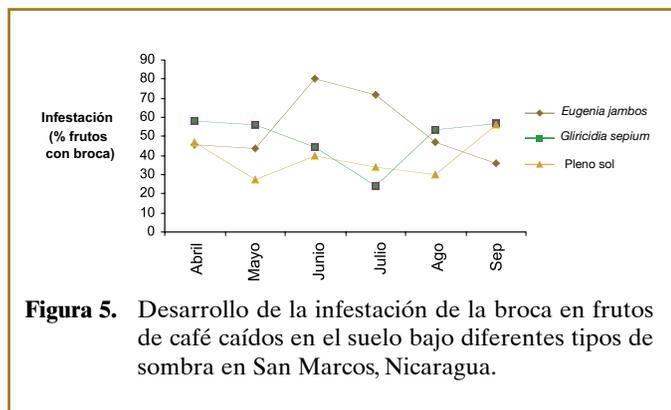


Figura 5. Desarrollo de la infestación de la broca en frutos de café caídos en el suelo bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

La población de broca en frutos caídos tuvo una mayor incidencia en la época seca (abril; ver Fig. 6 para un ejemplo), cuando hubo una mayor disponibilidad de frutos en el suelo; luego, disminuyó paulatinamente a medida que la cantidad de frutos en el suelo era menor y cuando, al mismo tiempo, aumentó el número de frutos disponibles en las plantas en la época lluviosa (mayo-septiembre). Además, en esta última época hubo una mayor humedad en el suelo, lo cual parece ser un factor determinante para que el insecto lo abandone e inicie su colonización de frutos en la planta (Decazy 1990).

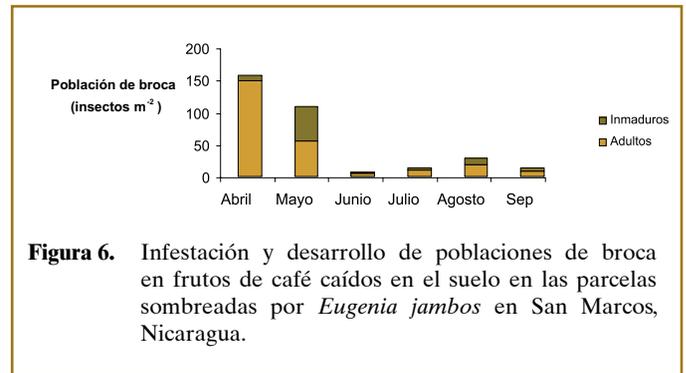


Figura 6. Infestación y desarrollo de poblaciones de broca en frutos de café caídos en el suelo en las parcelas sombreadas por *Eugenia jambos* en San Marcos, Nicaragua.

Epidemiología de la broca en frutos de café en la parte aérea bajo diferentes ambientes de sombra

El desarrollo de la infestación (% de frutos con broca) en la planta fue mayor en las plantaciones bajo la sombra densa de *E. jambos* (de 17 a 25%) en comparación con la sombra media de *G. sepium* y a pleno sol (<2%). El número de individuos de broca por planta de café también fue mayor bajo la sombra de *E. jambos* que en las parcelas a pleno sol o bajo *G. sepium* (Fig. 7).

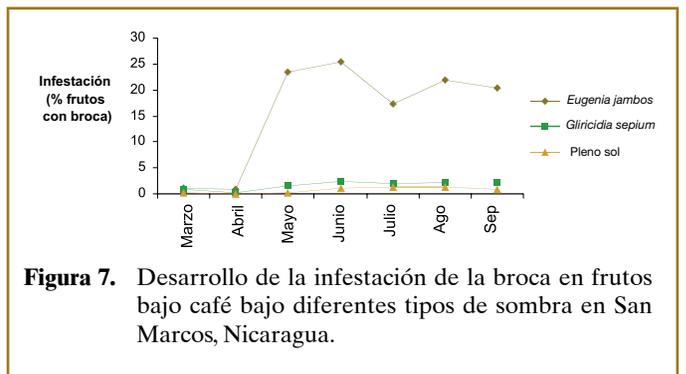


Figura 7. Desarrollo de la infestación de la broca en frutos bajo café bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

Diseño de sombra para la supresión de plagas en los cafetos

La mayoría de las comparaciones del efecto de la sombra en la fenología y las plagas del café han sido entre sombra densa y pleno sol (Berjamin 1944, Le Pelley

1969, Muñoz *et al.* 1987). Sin embargo, el nivel de sombra es dinámico, debido a los cambios fenológicos y al manejo (podas) de los árboles, lo cual puede influir en las plagas del café y sus enemigos naturales. Por ejemplo, muchas especies utilizadas como sombra (incluyendo *G. sepium*) pierden su follaje en la época seca, mientras que en la época lluviosa se presenta la recuperación del follaje, que disminuye significativamente la disponibilidad de luz solar para los cafetos (Tavares *et al.* 1999).

Los cafetos sombreados son más propicios para el desarrollo de altas infestaciones de broca que aquellos expuestos al sol (Berjamin 1944, Muñoz *et al.* 1987; Fig. 8). De lo anterior se deduce que conservando los cafetos con sombra regulada (40-50%) se puede mantener la baja incidencia de la broca. Waterhouse y Norris (1989) y Le Pelley (1969) recomiendan manejar el café sin sombra y/o con poca sombra para disminuir la infestación de la broca.

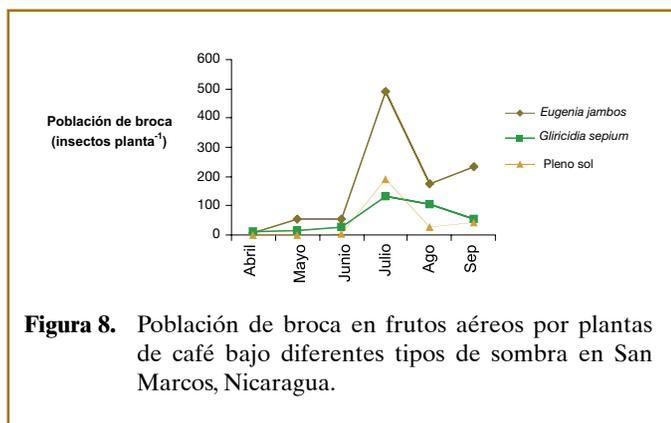


Figura 8. Población de broca en frutos aéreos por plantas de café bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua.

La broca es más activa en condiciones de mucha sombra y alta humedad relativa (Baker 1985). Es probable que las condiciones microambientales que se mantuvieron con sombra media de *G. sepium* y a pleno sol en este estudio ($> 28^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $< 74\%$) hayan perturbado el desarrollo de la infestación. Sponagel (1994) afirma que el grado real de infestación depende de la periodicidad de la producción (infestación baja en meses de alta cosecha; infestación alta en meses de baja cosecha). Sin embargo, en el presente estudio el grado de infestación de la broca en las partes aéreas de las plantas no fue proporcional a la disponibilidad de frutos en las plantas de café.

Hernández y Sánchez (1972) señalan que la broca no realiza vuelos durante las lluvias y que las hembras prefieren volar entre las 12:00 y las 17:00. Por lo tanto, se espera una mayor mortalidad de la broca en las

plantaciones con sombra media y a pleno sol, debido a las altas temperaturas en horas de la tarde. En la sombra bajo *G. sepium*, la población de broca se mantuvo en niveles bajos. Por otro lado, Guharay *et al.* (2001) señalan que la sombra y un mayor nivel de humedad favorecen al hongo *Beauveria bassiana* (enemigo natural de la broca), porque protegen al hongo de los rayos ultravioleta, especialmente en la mañana y en la tarde. Sin embargo, para que esporule sobre los cadáveres de la broca, el hongo necesita cierta exposición a la luz. Tal vez por esta razón solo se encontró *B. bassiana* (en bajos niveles) bajo la sombra media de *G. sepium* (Félez 2002).

Un ciclo anual de podas generaría condiciones contradictorias para diferentes plagas, sus enemigos naturales y el café. Hay que utilizar especies que soporten las podas, como *Erythrina* spp., *G. sepium* e *Inga* spp. para manipular la sombra en diferentes maneras durante el año productivo del café. Así, el diseño para la supresión de plagas en cafetales se podría enfocar de la siguiente manera: durante la época seca (4-6 meses) en el Pacífico de Nicaragua (noviembre a abril), mantener altos niveles de sombra favorecería la retención de las hojas viejas, el control del minador y la cochinilla y la supervivencia de hongos benéficos (Guharay *et al.* 2001). Por otro lado, las reducciones de la sombra pueden favorecer la actividad de parasitoides de la broca y la caída de hojas enfermas de la roya (*Hemileia vastatrix*), además de limitar la dispersión de la broca. En función de lo anterior, se recomienda que la sombra se mantenga entre 40-60% y que solo exceda el 50% al inicio de la época seca. En zonas cafetaleras bajas y secas, la sombra se debe reducir de 60 a 45-50% con las primeras lluvias. Debido a las fluctuaciones naturales de la sombra de *G. sepium* en las plantaciones de café de Nicaragua, hay períodos con condiciones subóptimas para la disminución de las plagas, y se podrían necesitar controles directos de algunas de ellas.

CONCLUSIONES

- Hubo una menor producción de café bajo sombra y se registró mayor incidencia y poblaciones de broca en plantas bajo la sombra densa de *E. jambos*, pero no hubo diferencia significativa entre pleno sol y sombra media de *G. sepium*. En cambio, las poblaciones de broca en los frutos en el suelo no variaron entre los diferentes tipos de sombra. Una mayor incidencia de luz solar reduce la humedad relativa del aire por debajo de 70% en las horas de la tarde en las plantaciones de café a pleno sol y bajo la

sombra de *G. sepium*. Esto podría limitar el vuelo de las hembras de la broca, que normalmente vuelan a estas horas en busca de frutos para la oviposición.

- Un ambiente de baja humedad probablemente causa alta mortalidad en las hembras de la broca, reduciendo así las poblaciones futuras. Por el contrario, la alta humedad relativa bajo la sombra de *E. jambos* favoreció las actividades de las hembras y aumentó las poblaciones en las plantas.

RECOMENDACIONES

- Para reducir pérdidas de la cosecha de café debidas a la broca se recomienda una sombra regulada con una cobertura de dosel de 40-50%.
- Falta estudiar más el efecto de la humedad relativa del aire sobre la mortalidad y las actividades de la broca bajo diferentes tipos de sombra, y repetir este estudio durante dos ciclos anuales más para poder evaluar el efecto de la sombra sobre las poblaciones de broca en las condiciones variables de las floraciones.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alonso, PFP. 1985. Avances de un programa integrado de investigación contra la broca. Congreso de Manejo Integrado de Plagas (3). Guatemala. 263-284 p.
- Baker, PS. 1985. La ecología y el comportamiento de la broca del café. In Simposio sobre Caficultura Latinoamericana (8, Granada, Nicaragua). Memoria. San José, CR, IICA. 225 p.
- Berjamin, J. 1944. O "repase" como método de controle da broca do café (*Hypothenemus hampei* Ferr. 1867) (Col. Ipidae). Arq. Do Inst. Biol. 15: 199-208.
- Castro, F; Montenegro, L; Aviles, C; Moreno, M; Bolaños, M. 1961. Efecto del sombrero en los primeros años de un cafetal. Turrialba 3(10): 81-102.
- Decazy, B. 1990. Descripción, biología, ecología y control de la broca del fruto del café *Hypothenemus hampei* Ferr. IRCC, PROMECAFE, ANACAFE. In 50 años de CENICAFE, 1938-1988. Conferencias conmemorativas. Centro de investigaciones de café "Pedro Uribe Mejía". Chinchina, Caldas, Colombia. 133-139 p.
- Feliz, D. 2002. Incidencia y poblaciones de broca (*Hypothenemus hampei*) en árboles de café y tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 75 p.
- Guharay, F; Monterroso, D; Monterrey, J; Staver, C. 2000. Manejo Integrado de Plagas en el Cultivo del Café. CATIE, Managua, Nicaragua. 267 p. (Serie Técnica. Manual Técnico no. 44).
- _____, Monterroso, D; Staver, C. 2001. El diseño y manejo de la sombra para la supresión de plagas en cafetales de América Central. Agroforestería en las Américas 8(29): 22-29.
- Hernández PM; Sánchez de L. 1972. La broca del fruto del café. ANACAFE, Boletín N° 11. Guatemala. 172 p.
- Le Pelley, RH. 1969. Las plagas del café. Agricultura tropical. Editorial Labor S.A. Barcelona, España. p. 140-170.
- Muñoz, RI; Andino, A; Zelaya, RR. 1987. Fluctuación poblacional de la broca del fruto del café (*Hypothenemus hampei* Ferr.) en la zona del Lago de Yojoa. In Taller Internacional sobre la broca del grano del café (*Hypothenemus Hampei* Ferr.) (2, 1987). Memorias. Chiapas, MX, IICA, PROMECAFE, INMECAFE. p. 75-99.
- Ochoa, MH; Campos, AO; Vidal, SB; Decazy, B. 1990. Determinación de pérdidas en la cosecha por broca del fruto del café (*Hypothenemus hampei* Ferr.) en función de diferentes porcentajes de infestación. In Taller regional de broca (3, 1990). Resumen. IICA. PROMECAFE. p. 81-86.
- Renna, AB; Barros, RS; Maestri, M; Söndahl, M. 1994. Coffee. In Shaffer, B; Andersen, PC. eds. Handbook of environmental physiology of fruit crops. Sub-Tropical and Tropical Crops. CRC Press. v. 2, 101-122 p.
- Souza, HC de; Reis, PR. 1980. Efecto da broca do café *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) na productio e qualidade do grao do café. In Congreso brasileiro de pesquisas cafeiras (9, 1980, Río de Janeiro, BR). 281-283 p.
- Sponagel, KW. 1994. La broca del café *Hypothenemus hampei* en plantaciones de café Robusta en la Amazonía Ecuatoriana. Traducción: Wilma Miranda-Sponagel. Alemania. 185 p.
- Tavares, FC; Beer, J; Jiménez, F; Schroth, G; Fonseca, C. 1999. Experiencia de agricultores de Costa Rica con la introducción de árboles maderables en plantaciones de café. Agroforestería en las Américas 6(23): 17-20.
- Waterhouse, DF; Norris, KR. 1989. Biological control: pacific prospects. Supplement 1. Canberra, AU, Australian Center for International Research. 123 p.

Avances de Investigación

Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas y en mezclas¹

Rodolfo Munguía²; John Beer³; Jean-Michel Harmand⁴; Jeremy Hagggar³

Palabras claves: árboles de sombra; calidad de hojarasca; lixiviación; lignina; polifenoles.

RESUMEN

Se estudió la descomposición y liberación de nutrientes de hojarasca de *Eucalyptus deglupta* y *Coffea arabica* y de hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas o en mezclas, en dos fincas cafetaleras de la Zona Sur de Costa Rica. La hojarasca de *E. deglupta* tuvo la descomposición más lenta ($k = -0,08$ y $-0,16$), mientras que la de *E. poeppigiana* fue la más rápida ($k = -0,58$; evaluada solamente en una finca). La presencia de hojas verdes de *E. poeppigiana* aumentó las tasas de descomposición y liberación del P en la hojarasca de *C. arabica* y de K en la de *E. deglupta*. Los contenidos de N, P, K y la homocelulosa estuvieron relacionados positivamente con las tasas de descomposición, mientras que los polifenoles y la relación lignina:N tuvieron una correlación negativa.

Decomposition and nutrient release rates of *Eucalyptus deglupta* and *Coffea arabica* litter and *Erythrina poeppigiana* green leaves, alone or mixed

Key words: leaf litter quality; lignin; lixiviation; polyphenols; shade trees.

ABSTRACT

The decomposition and nutrient release from *Eucalyptus deglupta* and *Coffea arabica* leaf litter and *Erythrina poeppigiana* green leaves, alone or mixed, was studied on two coffee farms in Southern Costa Rica. *E. deglupta* litter had the slowest decomposition rates ($k = -0.08$ and -0.16), while the decomposition of *E. poeppigiana* litter was fastest ($k = -0.58$; evaluated only in one farm). The presence of green *E. poeppigiana* leaves increased the rates of decomposition and release of P from *C. arabica* litter and of K from *E. deglupta* litter. The concentrations of N, P, K and homocellulose were positively correlated to decomposition rates, whereas polyphenol and the lignin:N ratio were negatively correlated.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas agroforestales, los árboles contribuyen al incremento de la materia orgánica del suelo a través de la adición de hojarasca, residuos de podas y raíces muertas y, por lo tanto, mantienen o aumentan su fertilidad (Palm y Sánchez 1990, Mafongoya *et al.* 1998, Basavaraju y Gururaja 2000). La descomposición de la hojarasca libera N, P, K, Ca, Mg y otros nutrientes a diferentes tasas, dependiendo de la calidad de la hojarasca; es decir, la concentración de N, la relación C:N, y el contenido de celulosa, homocelulosa, polifenoles y lignina (Palm y Rowland 1997, Montagnini *et al.* 1999,

Moorhead *et al.* 1999, Berg 2000). Cuando se reemplazan los árboles de sombra tradicionales del café (*Coffea* spp.) —generalmente leguminosas como *Erythrina* spp. e *Inga* spp.— con árboles maderables de rápido crecimiento, como *Eucalyptus deglupta*, la disponibilidad de nutrientes podría cambiar debido a una descomposición más lenta de la hojarasca de baja calidad. El presente estudio tuvo como propósito determinar las tasas de descomposición y liberación de N, P y K en hojarasca sola o en mezclas de materiales de rápida y lenta descomposición en dos fincas comerciales de café en Costa Rica.

¹ Basado en Munguía H, R de J. 2002. Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y de hojas verdes de *Erythrina poeppigiana* solas y en mezclas. Tesis Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Sede Central, 2002. Correo electrónico: rodolmung@hotmail.com (autor para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: jbeer@catie.ac.cr; jhagggar@catie.ac.cr

⁴ CIRAD/Foret-CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: jean_michel.harmand@cirad.fr

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron dos plantaciones de cuatro años de edad de *Coffea arabica* cv. Costa Rica 95, a 2 x 1 m (5000 plantas ha⁻¹), con sombra de *E. deglupta* a 6 x 6 m (278 árboles ha⁻¹), en las fincas Verde Vigor (9°15'N y 83°29'O) y Santa Fe (9°18'N y 83°36'O), ubicadas entre 600 y 700 msnm, en la Zona Sur de Costa Rica (cantón de Pérez Zeledón). Ambos sitios presentan un clima tropical lluvioso, con una estación seca de enero a marzo y precipitaciones de 3614 y 3507 mm, respectivamente (promedio de 1998 a 2002). Las temperaturas varían entre 17,6 y 31,4 °C, con 85% de humedad relativa. Los suelos son Ustic Palehumult (Kanten *et al.* 2004), con pendientes de entre 9 y 33%. La poda de los cafetales y los árboles de sombra, la fertilización, el manejo de las malezas y los controles fitosanitarios fueron intensivos (Kanten *at al.* 2004), siguiendo las normas comerciales de las fincas.

El trabajo se llevó a cabo en los lotes asignados por la gerencia de las fincas al grupo de investigadores de CATIE (ver Kanten *et al.* 2004 y Ávila *et al.* 2004 para mayores detalles). Dentro de estos lotes se buscó árboles con copas homogéneas y semejantes entre sí para ubicar los bloques. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con la selección de cuatro árboles (bloques) de *E. deglupta* en cada finca. Se establecieron cinco tratamientos en Verde Vigor y tres en Santa Fe (Cuadro 1) bajo cada árbol. Los tratamientos consistieron de hojarasca recién caída (natural) de *E. deglupta* y/o *C. arabica* y/o hojas verdes de residuos de poda de *Erythrina poeppigiana* (solos o en mezclas) cosechadas en una finca colindante, Santa Ana.

Cuadro 1. Tratamientos de descomposición de hojarasca evaluados en las fincas Verde Vigor y Santa Fe, Cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica

Composición de la hojarasca	Proporciones de componentes (%)	
	Verde Vigor	Santa Fe
	Solo <i>Eucalyptus deglupta</i>	100
Solo <i>Erythrina poeppigiana</i>	100	—
Solo <i>Coffea arabica</i>	—	100
<i>E. deglupta</i> + <i>E. poeppigiana</i>	50 : 50	—
<i>C. arabica</i> + <i>E. deglupta</i>	50 : 50	50 : 50
<i>C. arabica</i> + <i>E. deglupta</i> + <i>E. poeppigiana</i>	33 : 33 : 33	—

Se usaron bolsas de nylon de 30 x 30 cm (30 g de materia seca por bolsa), con rejillas de 1 mm (lado inferior) y 4 mm (lado superior), colocadas sobre el piso del suelo

bajo la copa de las plantas de café. Se recolectó una bolsa por tratamiento y árbol (bloque) a los 0, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 150 y 213 días de exposición. El contenido de las bolsas fue limpiado de materiales extraños, separado por especie y secado al horno a 65 °C hasta peso constante. El material de las cuatro bolsas de un mismo tratamiento y finca se juntó, obteniendo una muestra homogénea por especie, la cual fue molida y tamizada en una malla de 1 mm. La concentración de K fue determinada por medio de espectrofotometría de absorción atómica, el P por colorimetría y el N total por el método de Microkjeldahl.

Los datos mostraron un comportamiento exponencial negativo, y se ajustó el modelo exponencial simple (con transformación logarítmica) indicado por Olson (1963); es decir, $W_f = W_i e^{-kt}$, donde W_f es el peso seco remanente o cantidad remanente de N, P y K; W_i es el peso seco inicial o cantidad inicial de cada elemento mineral; k es la constante de descomposición o liberación de nutrientes; t el tiempo de descomposición de la hojarasca en días; y e es el logaritmo natural. Los valores por tratamiento (k para peso o cantidad remanente de N, P y K) se evaluaron con ANOVA (Wieder y Lang 1982). Se calculó también la correlación entre las tasas de descomposición y la composición inicial de la hojarasca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Suelos

Los suelos de la finca Santa Fe son mejores que los de la finca Verde Vigor (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características químicas de los suelos de las fincas Verde Vigor y Santa Fé, cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica

Finca	pH (H ₂ O)	Elementos minerales (cmol kg ⁻¹)				Materia orgánica (%)
		P	K	Ca	Mg	
Verde Vigor	5,1	7,7	0,16	3,6	0,13	7,2
Santa Fe	6,2	9,1 ⁽²⁾	0,40	11,5	1,99	10,4

⁽²⁾ mg litro⁻¹

Composición inicial de la hojarasca

Las concentraciones de K, P y N en la hojarasca siguen el orden *E. poeppigiana* > *C. arabica* > *E. deglupta* (Cuadro 3). El contenido de lignina (%) es mayor en la hojarasca de *C. arabica* y menor en las hojas de *E. poeppigiana*; el contenido de polifenoles es alto para *E. deglupta* y mayor a los determinados

por Domínguez (1994) en *Eucalyptus globulus*, pero similar a *Eucalyptus camaldulensis*, lo que sugiere que *E. deglupta* va a presentar una lenta descomposición y liberación de nutrientes. Los estudios realizados en especies de *Eucalyptus* por George (1982), O'Connell (1986), Bahuguna *et al.* (1990) y Domínguez (1994) indican valores de K de entre 0,25 y 0,89%, y de N entre 0,33 y 1,74%. Por lo tanto, se puede considerar que los valores de K para *E. deglupta* son altos, mientras los de N son típicos para *Eucalyptus* spp. El alto contenido de N en las hojas de *E. poeppigiana* se debe al estadio joven de las hojas obtenidas de los residuos de una poda. Palm y Sánchez (1990) reportaron un 3,5% de N en hojas de *Erythrina* spp. y concentraciones de P y K similares a las del presente estudio. La concentración de N en la hojarasca de *C. arabica* se encuentra en el rango obtenido por Aranguren *et al.* (1982), de 0,42 a 1,97%.

Descomposición de hojarasca

En la finca Verde Vigor, la descomposición de la hojarasca de *E. deglupta* sola mostró la tasa diaria más baja con respecto a los demás tratamientos (Fig. 1A), descomponiéndose un 23% a los 213 días. En tanto, *E. poeppigiana* sola obtuvo la tasa más alta, con un 86% de descomposición del material en el mismo período. Las mezclas en las cuales estuvo presente *E. poeppigiana* se ubican en un orden intermedio, descomponiéndose hasta un 59%. En la finca Santa Fe (Fig. 1B), la tasa de descomposición de *C. arabica* (60% del material a los 213 días) fue mayor que en *E. deglupta* o en la mezcla de ambas, con 39 y 47%, respectivamente.

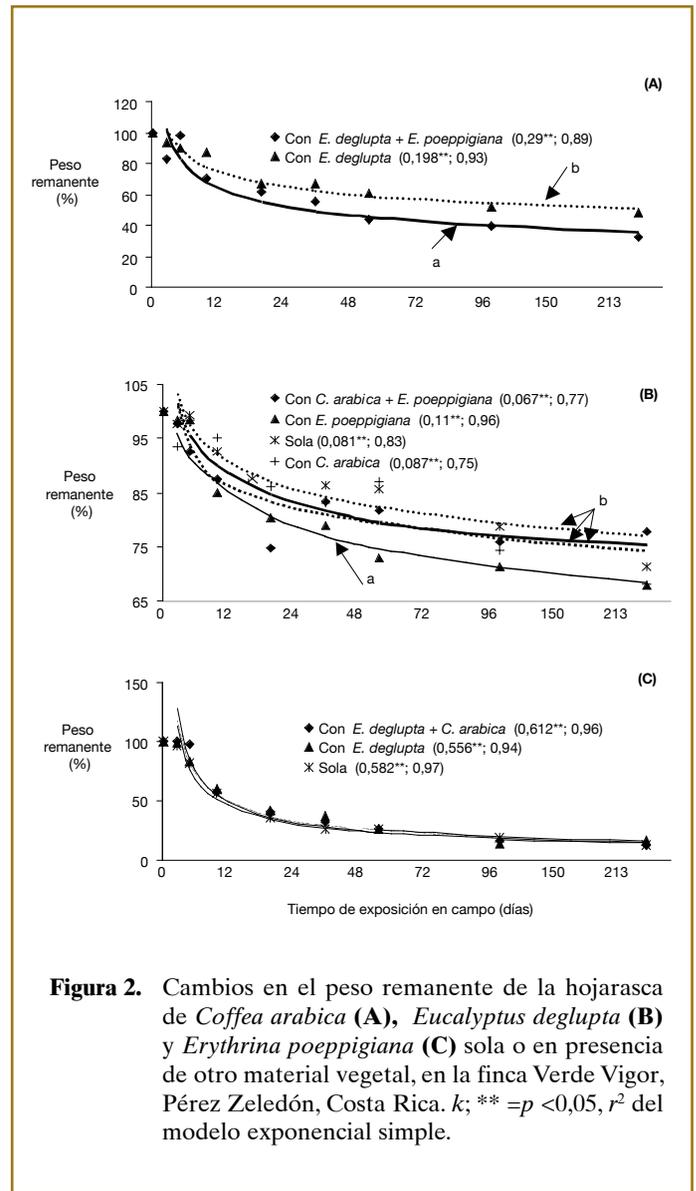
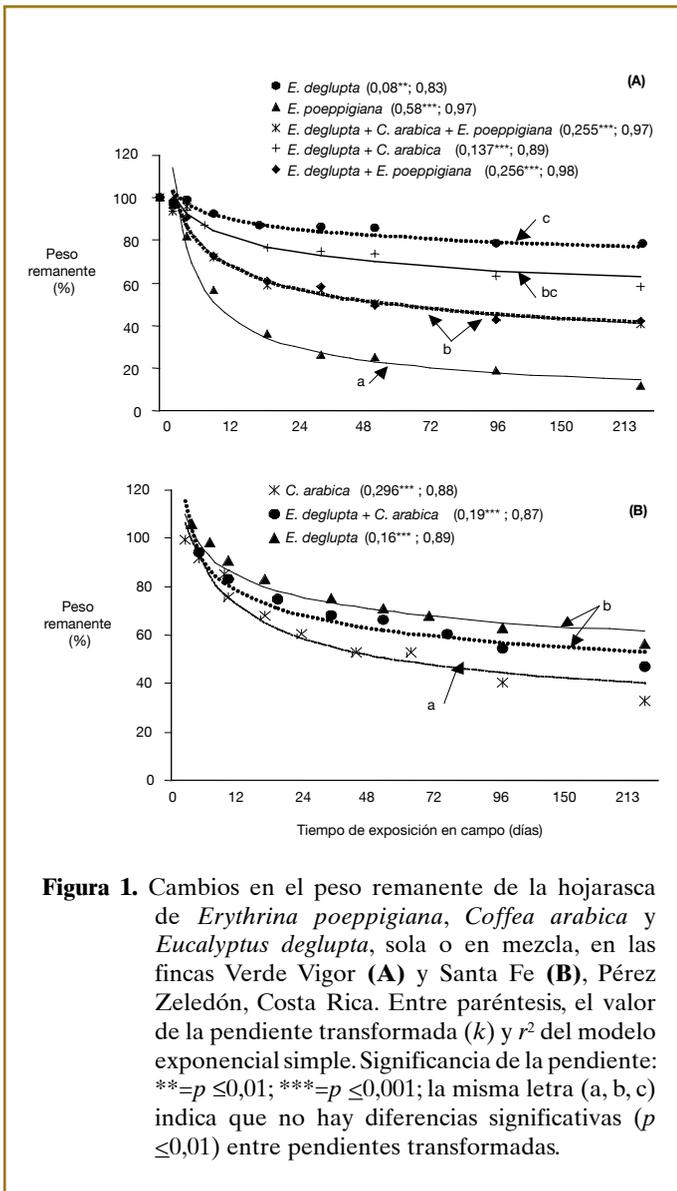
La descomposición de *C. arabica* en mezcla con *E. deglupta* en Verde Vigor fue más rápida cuando se incluyó *E. poeppigiana* ($p > t = 0,028$; Fig. 2A). La presencia de *E. poeppigiana* con la hojarasca de *E. deglupta* aceleró ($p > F = 0,029$) la tasa de descomposición de esta última (Fig. 2B). La descomposición de las hojas verdes de *E. poeppigiana* no fue afectada por la presencia de las demás especies (Fig. 2C). La separación por especie en la finca Santa Fe no fue posible después de los 96 días; en esta finca no se detectó un efecto de *C. arabica* sobre *E. deglupta*, y viceversa.

Las lentas tasas de descomposición de *E. deglupta* se deben probablemente al alto contenido de polifenoles y menores contenidos de N y homocelulosa (Cuadro 3). En la finca Santa Fe, la velocidad de descomposición fue del doble, posiblemente debido a las mejores condiciones del suelo (Cuadro 2) y/o a la mayor cantidad de sombra proyectada por los árboles y, consecuentemente, a la mayor humedad en la capa de hojarasca, las cuales favorecieron este proceso (Pande 1999). La presencia de un material de alta calidad —como *E. poeppigiana* con un 5,74% de N, alto contenido de homocelulosa pero bajo en polifenoles (Cuadro 3)—, que incrementan la actividad de los microorganismos descomponedores (Palm y Sánchez 1990), favorece la descomposición de las demás especies en mezclas. La descomposición de *C. arabica* fue mayor que la de *E. deglupta*, debido a una mayor concentración de N y/o menor contenido de polifenoles en el primero. Sin embargo, la presencia de *C. arabica* no afectó la descomposición de *E. deglupta*.

Cuadro 3. Calidad de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica

Fincas y especie ⁽²⁾	K	P	N	Homocelulosa (%)	Lignina	Polifenoles (mg g ⁻¹)
Verde Vigor						
<i>E. deglupta</i>	0,96	0,06	0,89	25	37	93
<i>C. arabica</i>	2,28	0,06	1,91	31	45	38
<i>E. poeppigiana</i>	2,30	0,40	5,74	45	34	20
Santa Fe						
<i>E. deglupta</i>	0,61	0,06	0,90	26	39	67
<i>C. arabica</i>	1,67	0,15	1,55	33	43	28

⁽²⁾ Fuentes del material estudiado.



Liberación de nutrientes

En la finca Verde Vigor, el K mostró la tasa de liberación más alta y la liberación de nutrientes de *E. poeppigiana* fue la más rápida. Comparando los tratamientos, la liberación del P y N muestran la misma tendencia que el K; sin embargo, *E. deglupta* presenta inmovilización con respecto al N y P, incrementando su contenido en el remanente (Cuadro 4). La presencia de otro material no mostró efectos significativos en la liberación de K y N en *C. arabica*; mientras que la presencia de *E. poeppigiana* aumentó la tasas de liberación de P de *C. arabica*. En presencia de *E. poeppigiana*, la liberación de K de la hojarasca de *E. deglupta* también aumentó, pero no hubo liberación de P y N de *E. deglupta*. La liberación

de nutrientes de *E. poeppigiana* no fue afectada por la presencia de otros componentes (Cuadro 4). La alta liberación de N, P y K ocurridas en *E. poeppigiana* se debió a su elevada calidad nutricional (Palm y Sánchez 1990); asimismo, esta influyó en la liberación del K de *E. deglupta*.

En la finca Santa Fe, *C. arabica* liberó más rápidamente P, K y N, mientras que *E. deglupta* solo no liberó P y N durante el período del estudio (Cuadro 5). La separación por especie hasta los 96 días mostró liberación de K en *E. deglupta* y *C. arabica*, los cuales fueron influenciados por la presencia de otro material; sin embargo, se dio una inmovilización de P y N en *E. deglupta*. Dicha

Cuadro 4. Tasas de liberación de nutrientes (*k*) a los 213 días de exposición de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Erythrina poeppigiana* o *Coffea arabica* en el suelo de la finca Verde Vigor, Cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica

Tratamientos de hojarasca	Tasa de liberación de nutrientes (<i>k</i>)		
	P	K	N
<u>Hojarasca sola o en mezcla</u>		$p > F = < 0,0001$	
<i>E. deglupta</i>	0,12 ns d	- 0,49** d	0,006 ns c
<i>E. poeppigiana</i>	- 0,94** a	- 1,55** a	- 0,68** a
<i>E. deglupta</i> + <i>C. arabica</i> + <i>E. poeppigiana</i>	- 0,58** b	- 1,02** b	- 0,29** b
<i>E. deglupta</i> + <i>C. arabica</i>	- 0,09 ns c	- 0,84** c	- 0,046** c
<i>E. deglupta</i> + <i>E. poeppigiana</i>	- 0,62** b	- 1,08** b	- 0,38** b
<u><i>C. arabica</i> en presencia de:</u>	$p > t = 0,002$	$p > t = 0,12$	$p > t = 0,056$
<i>E. deglupta</i> + <i>E. poeppigiana</i>	- 0,31** a	- 1,16** a	- 0,17** a
<i>E. deglupta</i>	- 0,14* b	- 1,10** a	- 0,094** a
<u><i>E. deglupta</i> en presencia de:</u>		$p > F = < 0,0001$	
<i>C. arabica</i> + <i>E. poeppigiana</i>	0,031 ns b	- 0,52** c	0,13** d
<i>E. poeppigiana</i>	0,15 ns d	- 0,73** a	0,034 ns b
Solo	0,12 ns c	- 0,49** d	0,006 ns a
<i>C. arabica</i>	- 0,035 ns a	- 0,56** c	0,034 ns c
<u><i>E. poeppigiana</i> en presencia de:</u>	$p > F = 0,082$	$p > F = 0,45$	$p > F = 0,39$
<i>E. deglupta</i> + <i>C. arabica</i>	- 1,06** a	- 1,60** a	- 0,74** a
<i>E. deglupta</i>	- 0,98** a	- 1,60** a	- 0,70** a
Solo	- 0,94** a	- 1,55** a	- 0,68** a

ns=no significativo; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$ con referencia a la significancia de la pendiente transformada de cada modelo (*k*); valores positivos implican incrementos y/o inmovilización; valores de *k* seguidos por la misma letra en la misma sección de una columna no tienen diferencia significativa ($p \leq 0,05$).

inmovilización puede deberse a la reincorporación e inclusive importación de elementos minerales a través de las hifas de los hongos desde la interfase inferior de la hojarasca-suelo, a la demanda de nutrientes de los descomponedores para su alimentación (O'Connell 1986) y/o a la adición a través de precipitaciones durante la descomposición (O'Connell 1986, Bahuguna *et al.* 1990, Briones e Inenson 1996).

Relación entre las tasas de descomposición y los componentes químicos de la hojarasca

Las tasas de descomposición de la hojarasca tuvieron una correlación positiva con el contenido de homocelulosa y las concentraciones de P, N y K, y negativa con el contenido de polifenoles y la relación lignina:N (Cuadro 6). Mafongoya *et al.* (1998) sugieren que la relación polifenoles+lignina:N (correlación negativa

con la descomposición también en el presente estudio) fue el índice más robusto para predecir las pérdidas de masa y para los modelos de liberación del N en sistemas agroforestales. Sin embargo, Wedderburn y Carter (1999) determinaron que el contenido de lignina era el mejor índice de liberación de los nutrientes, mientras que Taylor *et al.* (1989) indican que los mejores índices son la relación C:N, seguidos del contenido de N y la relación lignina:N. Por último, Palm y Sánchez (1990) sugieren que el contenido de polifenoles fue el factor que estuvo más relacionado con la descomposición de los materiales vegetales. Aunque las mismas variables fueron identificadas en todos estos estudios como indicadores de la capacidad de descomposición, al parecer no existe un indicador estándar, confiable para todos los sitios y materiales.

Cuadro 5. Tasas de liberación de nutrientes (*k*) hasta los 213 días de exposición de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta* o *Coffea arabica* en el suelo de la finca Santa Fe, cantón de Pérez Zeledón

Tratamientos	Tasa de liberación de nutrientes (<i>k</i>)		
	P	K	N
Hojarasca sola o en mezcla	$p > F = < 0,0001$	$p > F = < 0,0001$	$p > F = 0,0001$
<i>E. deglupta</i>	0,005 ns c	- 0,49 ** c	0,008 ns b
<i>E. deglupta</i> + <i>C. arabica</i>	- 0,11 * b	- 0,76 ** b	- 0,008 ns b
<i>C. arabica</i>	- 0,25 * a	- 1,13 ** a	- 0,10 * a

ns = no significativo, * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$ con referencia a la significancia de la pendiente transformada de cada modelo (*k*); valores de *k* seguidos por la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ($p \leq 0,05$); valores positivos implican incrementos y/o inmovilización.

Cuadro 6. Correlación entre las tasas de descomposición (*k*) y la composición inicial de la hojarasca estudiados en las fincas Verde Vigor y Santa Fe ($n = 8$), cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica

Componente	Correlación lineal (<i>r</i>)
Homocelulosa (celulosa + hemicelulosa)	0,97 **
Fósforo	0,96 **
Nitrógeno	0,91 **
Potasio	0,78 *
Calcio	0,70 ns
Magnesio	0,38 ns
Lignina	-0,51 ns
Relación polifenoles:N	-0,77 *
Relación lignina+polifenoles:N	-0,79 *
Relación lignina:N	-0,81 *
Polifenoles (taninos + fenoles)	-0,91 **

ns = no significativo; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$

CONCLUSIONES

La concentración de polifenoles parece limitar las tasas de descomposición de la hojarasca, mientras que altas concentraciones de celulosa hemicelulosa y de N, P y K están correlacionadas positivamente con altas tasas de descomposición. Ejemplo de esto es que la hojarasca de *E. poeppigiana* se descompuso y liberó nutrientes a tasas mucho mayores que las de *E. deglupta* y *C. arabica*. Sin embargo, el K se liberó muy rápido en todos los tratamientos, incluyendo los que contuvieron hojarasca de *E. deglupta*. Con la adición de hojas de *E. poeppigiana*, se aceleró la descomposición de hojarasca de *C. arabica* y *E. deglupta* y la liberación de K de la hojarasca de *E. deglupta*. Así, este trabajo mostró que la presencia de *E. poeppigiana* en cafetales mejora la descomposición de hojarasca de café y de *E. deglupta*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CASCA (Sistemas Agroforestales de Café en América Central), INCO-DEV: ICA-CT-2001-10071, que cuenta con financiamiento de la Unión Europea, a través del programa INCO.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aranguren, J; Escalante, G; Herrera, R. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. *Plant and Soil* 67: 247-258.
- Ávila, H; Harmand, JM; Dambrine, E; Jiménez, F; Beer, J; Oliver, R. 2004. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 41/42: 83-91.
- Bahuguna, VK; Negi, JD; Joshi, SR; Naithani, KC. 1990. Leaf litter decomposition and nutrient release in *Shorea robusta* and *Eucalyptus camaldulensis* plantation. *Indian Forester* 116(1): 103-114.
- Basavaraju, TB; Gururaja R, MR. 2000. Tree-crop interactions in agroforestry systems; a brief review. *Indian Forester* 126(11): 1155-1164.
- Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133: 13-22.
- Briones, MJI; Ineson, P. 1996. Decomposition of *Eucalyptus* leaves in litter mixtures. *Soil Biology Biochemistry* 28(10/11): 1381-1388.
- Domínguez, MT. 1994. Influence of polyphenols in the litter decomposition of autochthonous (*Quercus ilex* L., *Quercus suber* L., *Pinus pinea* L., *Cistus ladanifer* L. and *Halimium halimifolium* W.K.) and introduced species (*Eucalyptus globulus* L. and *Eucalyptus camaldulensis* D.) in the southwest of Spain. *Acta Horticulturae* 381: 425-428.
- George, M. 1982. Litter production and nutrient return in *Eucalyptus hybrid* plantation. *Indian Forester* 108(4): 253-259.
- Kanten Van, R; Beer, J; Schroth, G; Vaast, P. 2004. Interacciones competitivas entre *Coffea arabica* y árboles maderables de rápido crecimiento en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 41/42: 5-15.

- Mafongoya, PL; Giller, KE; Palm, CA. 1998. Decomposition and nitrogen release patterns of tree prunings and litter. *Agroforestry Systems* 38: 77-97.
- Montagnini, F; Jordan, CF; Matta, R. 1999. Reciclaje y eficiencia en el uso de nutrientes en sistemas agroforestales. *In* Montagnini, F. ed. *Management and Conservation of Forests and Biodiversity*. Collection of articles. Turrialba, CR, The International Foundation of Science – CATIE. 34 p.
- Moorhead, DL; Currie, WS; Rastetter, EB; Parton, WJ; Harmon, ME. 1999. Climate and litter quality controls on decomposition: an analysis of modeling approaches. *Global Biogeochemical Cycles* 13: 575-589.
- O'Connell, AM. 1986. Effect of legume understory on decomposition and nutrient content of eucalypt forest litter. *Plant and Soil* 92: 235-248.
- Olson, J. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44(2): 322-331.
- Palm, CA; Sánchez, PA. 1990. Decomposition and nutrient release patterns of the leaves of three legumes. *Biotropica* 22(4): 330-338.
- _____; Rowland, AP. 1997. A minimum dataset for characterization of plant quality for decomposition. *In* Dadish, G; Giller, KE. eds. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford, UK, CAB International. p. 379-392.
- Pande, PK. 1999. Litter decomposition in tropical plantations: impact of climate and substrate quality. *The Indian Forester* 125(6): 599-608.
- Taylor, BR; Parkinson, D; Parsons, WFJ. 1989. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology* 70(1): 97-104.
- Wedderburn, ME; Carter, J. 1999. Litter decomposition by four functional tree types for use in silvopastoral systems. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 455-461.
- Wieder, RK; Lang, GE. 1982. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology* 63(6): 1636-1642.

Avances de Investigación

Disponibilidad de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de *Coffea arabica*¹

Martha Gutiérrez Castillo²; Jean-Michel Harmand³; Etienne Dambrine⁴

Palabras claves: biomasa; *Erythrina poeppigiana*; *Eucalyptus deglupta*; *Inga* spp.; mineralización de N; nitratos; *Terminalia* spp.; *Zea mays*.

RESUMEN

Se estudió la contribución de cinco especies de árboles de sombra —dos leguminosas (*Inga* spp. y *Erythrina poeppigiana*) y tres maderables (*Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia*) sobre la disponibilidad de N en la capa del suelo 0-10 cm en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) en la zona Pacífico Sur de Pérez Zeledón, Costa Rica. Los suelos estudiados fueron recolectados en tres sitios: Verde Vigor (Ultisol), Santa Fe (Ultisol) y San Pedro (suelo aluvial). Se utilizó maíz (*Zea mays*) en condiciones de invernadero como especie indicadora de la contribución de N de las especies de sombra al suelo. Al final de la estación seca (marzo 2002), los suelos bajo las especies maderables presentaron menores contenidos de NO_3^- que las parcelas de café a pleno sol o asociadas con árboles leguminosos. Las tasas de mineralización de N del suelo en condiciones anaeróbicas (Npm) fueron superiores bajo leguminosas en comparación con las maderables y a pleno sol. Para el sitio aluvial arenoso, las mayores producciones de biomasa y extracción de N por el maíz fueron obtenidas con los suelos de parcelas de leguminosas. En este sitio, las variables influenciadas por los árboles de sombra (NO_3^- y Npm del suelo; contenido de N en las raíces de los árboles y N liberado por estas) fueron relacionadas positivamente con la producción de biomasa y la extracción de N por el maíz.

Nitrogen availability in the soil under woody and leguminous shade species used in *Coffea arabica* plantations

Key words: Biomass; *Erythrina poeppigiana*; *Eucalyptus deglupta*; *Inga* spp.; N mineralization; nitrates; *Terminalia* spp.; *Zea mays*.

ABSTRACT

The contribution of five shade tree species (leguminous: *Inga* spp. or *Erythrina poeppigiana*, and timber: *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* or *Terminalia amazonia*) to N availability in the 0-10 cm soil layer was studied in coffee (*Coffea arabica*) agroforestry systems in the southern Pacific zone of Perez Zeledon, Costa Rica. The soils studied were collected from three sites: Verde Vigor (Ultisol), Santa Fe (Ultisol) and San Pedro (alluvial soil). Maize (*Zea mays*), cultivated in a greenhouse, was used as an indicator species of N contribution to the soil from each shade species. At the end of the dry season (March 2002), soils under the timber species had lower NO_3^- contents compared to coffee in full sun or associated with leguminous trees. Mineralisation rates of soil N in anaerobic conditions (Npm) were higher under leguminous trees than under timber trees or in full sun. For the alluvial sandy site, biomass production and N extraction by maize was greater with the soils from the plots with leguminous species. For this site, the parameters influenced by the shade species (soil NO_3^- and Npm; N content and N release from the tree roots) were positively related with biomass production and N extraction by the maize.

¹ Basado en: Gutiérrez C, M. 2002. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

² Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. Km 12,5 Carretera Norte. Apto. 453.

³ CIRAD-Forêt/CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: jean-michel.harmand@cirad.fr (autor para correspondencia).

⁴ INRA, Cycles biogeochimiques, Nancy, Francia. Correo electrónico: dambrine@nancy.inra.fr

INTRODUCCIÓN

Recientemente, en las zonas bajas (600 a 800 msnm) del sur de Costa Rica, se ha estado cultivando café (*Coffea arabica*) fuera de su área tradicional, y se han introducido árboles maderables de valor comercial y rápido crecimiento, como *Eucalyptus deglupta* y *Terminalia* spp., en sustitución de árboles leguminosos tradicionales de sombra, como *Erythrina poeppigiana* e *Inga* spp. (Morales y Beer 1987, Tavares *et al.* 1999). Si las especies leguminosas pudieran mejorar la disponibilidad de N en el suelo por medio de la fijación atmosférica y el reciclaje (Fassbender 1993), su sustitución por especies maderables no leguminosas podría reducir la disponibilidad de nutrientes como el N por falta de fijación, por absorción o, quizás, reduciendo la mineralización.

El objetivo del presente estudio consistió en evaluar la influencia de las especies leguminosas *Inga* spp. y *E. poeppigiana*, así como de las maderables *E. deglupta*, *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia*, sobre la disponibilidad del N en el suelo en sistemas agroforestales con café en la zona Pacífico Sur de Costa Rica. Se midió el contenido de N mineral del suelo al final de la estación seca y el N potencialmente mineralizable del suelo; se identificaron los componentes del árbol de sombra (hojarasca, raíces) que influyen sobre la liberación de N y se estimó la producción de maíz (*Zea mays*) en condiciones de invernadero, como especie indicadora de la fertilidad del suelo obtenido de las diferentes asociaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en tres fincas cafetaleras (Verde Vigor, Santa Fé y CoopeAgri R.L.-San Pedro) ubicadas al sur de la ciudad de San Isidro del General, en el cantón de Pérez Zeledón, de la Provincia de San José, Costa Rica. Las fincas se encuentran entre las coordenadas 9°15'-9°18'N y 83°31'-83°36'O, con altitudes de entre 600 y 700 msnm. La zona de vida según Holdridge es Bosque Pluvial Montano Bajo. La precipitación anual varía entre 2740 mm (Santa Fe) y 3520 mm (Verde Vigor). Hay una estación seca acentuada entre enero y marzo. La temperatura media es de 23,5 °C y la humedad relativa de 87,5%. Los suelos se clasifican como ultisoles (Verde Vigor y Santa Fe) y aluviales (San Pedro).

Sistemas de cultivo estudiados

El estudio se llevó a cabo en el 2002, en diferentes sistemas de producción de *C. arabica* (Cuadro 1). En la finca Verde

Vigor, se estableció en 1998 un diseño experimental con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, pero en este estudio solo fueron utilizadas tres repeticiones, por la pérdida de la cuarta. El factor principal fue la especie de sombra y un testigo sin árboles. En la finca Santa Fe, se escogieron dos plantaciones comerciales adyacentes, con la misma historia y el mismo manejo (café con *E. deglupta* y café a pleno sol), en las cuales el café fue establecido en 1988. En la parcela con sombra, los árboles de *E. deglupta* fueron plantados en 1995. El ensayo de San Pedro fue establecido por el Instituto Costarricense del Café (ICAFE) en 1996. Se establecieron cinco parcelas (una a continuación de la otra sin replicación), cada una con una especie diferente de sombra. El sistema de café bajo sombra de *E. deglupta* fue el único sistema presente en todos los sitios.

En el año anterior al del estudio, las fincas recibieron 120 kg ha⁻¹ de fertilizante nitrogenado en Verde Vigor y Santa Fe, y 200 kg ha⁻¹ en San Pedro, aplicado en forma localizada cerca de cada tallo de café. Durante el presente estudio no hubo fertilización con N.

Toma de muestras de suelos

Se tomaron muestras de suelo a 0-10 cm de profundidad antes de las primeras lluvias (el 18 de marzo del 2002), con tres muestras compuestas en cada parcela en Santa Fe y San Pedro, y una muestra compuesta por parcela en Verde Vigor, donde hubo tres repeticiones. Para el muestreo, se seleccionaron al azar cuatro árboles de sombra en cada parcela (Verde Vigor) o subparcela (Santa Fe y San Pedro). Cada muestra de suelo compuesta estaba conformada por ocho submuestras (dos por árbol), tomadas a 1,5 m del árbol, entre dos hileras de café, en el centro de la calle. Simultáneamente, de los mismos puntos y profundidad (0-10 cm) se extrajeron muestras de suelo (2 kg) para establecer el experimento de producción de maíz en invernadero.

Se llevaron los suelos al laboratorio del CATIE, donde se determinó el C orgánico, N total, pH y N mineral. Para evaluar el N potencialmente mineralizable en condiciones de laboratorio, se utilizaron dos métodos de incubación: aeróbica de suelos a 28 °C en humedad fijada, y anaeróbica a 40 °C. Con el método de incubación aeróbica, se utilizaron los suelos humedecidos a dos niveles de humedad: el primero estuvo cerca de la capacidad de campo (42% en el suelo arenoso y 53% en los ultisoles), y el segundo fue de 27% en suelo arenoso y 36% en los ultisoles. Se midió el contenido de nitratos y amonio del suelo a los 0, 7, 21 y 35 días de incubación.

Cuadro 1. Características de los sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) estudiados en la Zona Sur de Costa Rica

Sistema de café: a pleno sol o con árboles de sombra	Tipo de suelo	Parcelas estudiadas (no.)	Tamaño de las parcelas (m x m)	Edad en el 2002 (años)		Densidad (unidad ha ⁻¹)	
				Árboles	Cafetos	Árboles	Cafetos
<u>Finca Santa Fé</u>		Ultisol					
Café a pleno sol		1	70 x 70	—	14	—	5819
<i>Eucalyptus deglupta</i>		1	70 x 70	7	14	110	6035
<u>Finca Verde Vigor</u>		Ultisol					
Café a pleno sol		3	40 x 40	—	4	—	4720
<i>E. deglupta</i>		3	48 x 42	4	4	250	4720
<i>Terminalia ivorensis</i>		3	48 x 42	4	4	250	4720
<i>Erythrina poeppigiana</i>		3	48 x 40	4	4	156	4720
<u>Finca San Pedro</u>		Aluvial					
<i>E. deglupta</i>		1	50 x 100	6	6	70	4900
<i>T. ivorensis</i>		1	50 x 100	6	6	270	4900
<i>Terminalia amazonia</i>		1	50 x 100	6	6	270	4900
<i>E. poeppigiana</i>		1	50 x 100	6	6	270	4900
<i>Inga</i> spp.		1	50 x 100	6	6	270	4900

En condiciones anaeróbicas, el suelo mezclado con agua en exceso fue incubado a 40 °C por siete días y se midió la producción de amonio durante este tiempo.

Toma de residuos de árboles de sombra e incubación de esos residuos en mezcla con suelo

En septiembre del 2002, se recolectaron residuos vegetales de las especies de sombra (hojas verdes de *E. poeppigiana* después de una poda, hojarasca de las otras especies y raíces finas de diámetro < 2mm) en la finca San Pedro. Se mezclaron estos residuos con suelo para incubarlos en el laboratorio y así medir su liberación de N. Con base en pesos secos, el 2% de la mezcla fue la materia vegetal adicionada; esta proporción correspondió a una cantidad de 0,77 a 2,24 g de material fresco por 60 g de suelo fresco. El suelo utilizado fue un inceptisol (0-10 cm), proveniente de un cafetal manejado orgánicamente, con pocos insumos, desde hace cuatro años en la finca experimental del CATIE. Dicho suelo tenía un pH de 4 en agua, con un contenido de C orgánico de 3,07%, de N total de 0,31% y humedad gravimétrica de 55%.

Se evaluaron 10 tratamientos correspondientes a los residuos de las especies en estudio, más un testigo sin

residuos, los cuales fueron replicados cuatro veces. Las muestras se incubaron a 28 °C en contenedores cubiertos con un plástico semipermeable, permitiendo el intercambio gaseoso. Se midió el contenido de N mineral de las muestras después de 24 horas y también a los siete días después de estar en el incubador. La liberación del N por los residuos se obtuvo por diferencias entre los valores de N acumulado en las mezclas de suelos con residuos y en el suelo solo.

Experimento de producción de maíz en invernadero

Utilizando el suelo procedente de cada parcela (Cuadro 1), se llenaron macetas de 2 dm³, en las cuales se estableció el maíz. Se replicó cada tratamiento en cuatro macetas, obteniéndose la cuarta a partir de una mezcla de las tres muestras tomadas en el campo. Se sembraron cuatro semillas de maíz por maceta, dejando dos plantas en cada una de ellas por medio del raleo realizado 10 días después de la germinación (ddg). Para compensar la deficiencia de P en los suelos, se aplicó semanalmente súper fosfato triple. Las plantas fueron cosechadas a los 45 ddg. Por separado, se pesaron las partes aérea y radical de cada planta (dos por maceta), después de secarlas al horno a 60 °C hasta peso constante. Posteriormente, se determinó el contenido de N de cada parte.

Análisis estadístico

Se analizaron las variables de caracterización de los suelos —pH, C orgánico, N total, C:N, N mineral y Npm (N mineralizado en condiciones anaeróbicas en el laboratorio)— bajo el modelo de un diseño completamente al azar en arreglo factorial con efecto anidado (especies dentro del sitio). A las variables biomasa y N total del maíz, así como N mineral liberado de los residuos de árboles, se les aplicó el diseño de bloques completamente al azar con distribución unifactorial. Se calculó la correlación lineal de los datos del maíz con las variables de caracterización del suelo y N liberado por los residuos de árboles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los suelos

El suelo ultisol de Verde Vigor era más arcilloso y de una coloración más roja que el suelo de Santa Fe, y el suelo franco arenoso de San Pedro estaba conformado por aluviones ricos en arena (Cuadro 2). El suelo de Verde Vigor presentó un contenido de N y C orgánico total (0,25 y 4,19%, respectivamente) más bajo que los suelos de Santa Fe (0,40 y 6,06%) y San Pedro (0,44 y 4,82%) (Cuadro 3). Comparando los sistemas de café con eucalipto, el suelo de Santa Fe tuvo un pH casi neutro (6,5), mientras que los suelos de San Pedro y Verde Vigor mostraron pH similares y ligeramente ácidos (5,4 y 5,6 respectivamente). El potencial de mineralización del suelo de Santa Fe (9,4 mg N kg⁻¹ d⁻¹) era más alto (3,8 y 4,8 en Verde Vigor y San Pedro, respectivamente), lo que resultó en un mayor contenido de N mineral del suelo en Santa Fe al final de la estación seca (Cuadro 3).

Sin embargo, cuando se compararon los tratamientos (tipo de sombra) dentro de cada sitio (Cuadro 3), solamente los contenidos de N-NH₄⁺ y/o N-NO₃⁻ del suelo en San Pedro y Santa Fe mostraron diferencias claras entre los tipos de sombra. En Santa Fe, el suelo

bajo café a pleno sol tuvo un contenido de nitratos mucho más alto que bajo sombra de *E. deglupta*. Esto puede atribuirse a una mayor absorción de nitratos por el sistema café-*E. deglupta*, al menos durante la estación seca, dado que no se encontró ningún efecto de los árboles de *E. deglupta* sobre la mineralización del N orgánico del suelo, así como en el estudio hecho *in situ* en el mismo lugar y al mismo tiempo por Ávila *et al.* (2004). En San Pedro, el suelo bajo *Inga* spp. presentó contenidos de nitratos más elevados que bajo los árboles maderables como *Terminalia* spp. y *E. deglupta*, mientras que *E. poeppigiana* se ubicó en una posición intermedia, indicando el efecto favorable de las especies leguminosas sobre el contenido de N mineral en el suelo. Puesto que los nitratos representan una gran proporción del N mineral total en San Pedro y Santa Fe (de 70 a 98%), los contenidos de N mineral siguen la misma tendencia que el nitrato. Aunque el contenido de N total del suelo puede ser menor bajo una leguminosa (*E. poeppigiana*) que bajo un maderable (*T. ivorensis*), como en el caso de San Pedro, la leguminosa siempre tiene niveles más altos de N mineral en el suelo, confirmando el efecto positivo de la leguminosa sobre este parámetro.

En todos los sitios se observó una mineralización aeróbica negativa, con una pérdida de 80 a 95% del N mineral inicial durante un lapso de 35 días (ver resultados en Gutiérrez 2002). Esto significa que el método clásico de medición de la mineralización aeróbica de N en laboratorio, con niveles fijos de temperatura y agua, no se adaptó para esos tipos de condiciones de campo. Por el contrario, se obtuvieron valores positivos de tasas de Npm tanto en condiciones aeróbicas en el mismo campo de estudio (Ávila *et al.* 2004) como en condiciones anaeróbicas en el laboratorio en el presente estudio (Cuadro 3). Esos últimos valores no mostraron ninguna diferencia significativa entre tipos de sombra; sin embargo, muestran una tendencia consistente a

Cuadro 2. Propiedades físicas de la capa 0-10 cm del suelo de los tres sitios bajo el sistema *Coffea arabica-Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica

Variable	Sitio		
	Verde Vigor	Santa Fe	San Pedro
Textura	Franco arcilloso o arcilloso	Franco arcilloso	Franco arenoso
Arena (%)	40	55	72
Limo (%)	23	22	22
Arcilla (%)	37	23	6
Color-Munsell	Rojizo 5 YR	Pardo 7,5 YR	Gris pardo 10 YR

Cuadro 3. Propiedades químicas de la capa del suelo 0-10 cm bajo los diferentes tipos de sombra de café (*Coffea arabica*) dentro de cada sitio en la Zona Sur de Costa Rica

Tipo de sombra	C org. (%)	N total (%)	C:N	pH H ₂ O	N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃ ⁻ Nmin			Npm ⁽²⁾ (mg N kg suelo ⁻¹ d ⁻¹)
					(mg N kg suelo ⁻¹)			
<u>Finca Verde Vigor</u>								
<i>Eucalyptus deglupta</i>	4,2a	0,25a	16a	5,6a	1,8b	6,0a	7,8a	3,8a ⁽³⁾
<i>Erythrina poeppigiana</i>	4,6a	0,27a	16a	5,6a	2,1b	9,6a	11,7a	3,9a
<i>Terminalia ivorensis</i>	3,6a	0,22a	15a	5,6a	4,5ab	5,1a	9,7a	2,7a
Café a pleno sol	4,1a	0,25a	16a	5,6a	7,6a	7,5a	15,2a	3,7a
p ⁽³⁾	0,82	0,79	0,92	0,98	0,05	0,13	0,21	0,65
<u>Finca Santa Fe</u>								
<i>E. deglupta</i>	6,1a	0,40a	15a	6,6a	1,7a	16,3b	18b	9,4a
Café a pleno sol	5,7a	0,40a	14a	6,9a	0,6a	41,7a	42,2a	9,2a
p ⁽³⁾	0,18	0,78	0,17	0,05	0,061	0,01	0,01	0,87
<u>Finca San Pedro</u>								
<i>E. deglupta</i>	4,8b	0,44b	11a	5,4a	0,9ab	10,0b	10,9a	4,8a
<i>E. poeppigiana</i>	4,8b	0,45b	11a	5,4a	1,7ab	15,3ab	17,0a	5,5a
<i>Inga</i> spp.	5,7ab	0,50ab	11a	5,4a	2,0a	18,0a	20,0a	5,3a
<i>T. ivorensis</i>	6,1a	0,57a	10a	5,5a	0,1b	9,6b	9,7a	4,9a
<i>T. amazonia</i>	5,3ab	0,50ab	10a	5,4a	4,2a	9,7b	13,9a	4,7a
p ⁽³⁾	0,03	0,03	0,28	0,96	0,03	0,02	0,06	0,93

⁽²⁾ Npm (N potencialmente mineralizable: N mineralizado en condiciones anaeróbicas en el laboratorio).

⁽³⁾ Dentro de cada sitio y para cada variable del suelo, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

⁽³⁾ Probabilidad de que exista diferencia significativa entre especies en el mismo sitio.

que las leguminosas tuvieran un nivel superior a las maderables y a pleno sol. Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Mogollón *et al.* (1997), quienes encontraron valores de Npm significativamente más altos en suelos de plantación de café bajo *Inga* spp. que en los suelos de plantaciones de café manejados con sombra de cítricos.

Liberación de N de las hojas, hojarasca y raíces de los árboles de sombra

Las hojas verdes de *E. poeppigiana* (que son el producto de la poda) presentan la concentración de N más alta de todos los residuos (Cuadro 4). La hojarasca de *Inga* spp. tuvo una concentración de N similar a la de los maderables. Para ambos tipos de residuos (hojarasca y raíces), *E. deglupta* presenta las concentraciones de N más bajas de todas las especies. En las raíces, que son menos ricas en N que la hojarasca, *E. poeppigiana* tiene la concentración de N más alta, mientras que *Inga* spp. posee una concentración intermedia entre *E. poeppigiana* y los maderables.

Después de un día de incubación en mezcla con suelo, todos los residuos vegetales mostraron liberación de N, excepto la hojarasca de *E. deglupta*, que inmovilizó el N (Cuadro 4). Las hojas de *E. poeppigiana* tuvieron la mayor producción de N mineral, consistente con su alta concentración inicial en N (3,8%). La hojarasca de *Inga* spp. se mineralizó más lentamente que la hojarasca de *T. ivorensis* y *T. amazonia*. En el caso de las raíces, las leguminosas se mostraron superiores en la liberación de N, e *Inga* spp. presentó la tasa de liberación más alta (cuando se calculó como porcentaje de la cantidad inicial a los siete días), lo que amerita estudios complementarios. En el caso de *E. poeppigiana*, la tasa de liberación de N de las hojas se incrementó de uno a siete días de incubación, mientras que las raíces no liberaron más N. Las raíces de *Inga* spp. no liberaron más N, mientras que su hojarasca mostró una fuerte inmovilización de N a los siete días. Los maderables presentaron una inmovilización de N en los residuos durante este período.

Cuadro 4. Concentración de N en los residuos vegetales y N mineral liberado por esos residuos en mezcla con suelo después de un día y siete días de incubación aeróbica en laboratorio

Tipo de residuo	Especie	Concentración en N de los residuos (%)	N liberado después de un día		N liberado después de siete días	
			(mg N kg suelo ⁻¹)	(% del N vegetal)	(mg N kg suelo ⁻¹)	(% del N vegetal)
Hoja verde	<i>Erythrina poeppigiana</i>	3,80	139,2a	6,7a	618,2a	29,7a
Hojarasca	<i>Inga</i> spp.	1,72	6,1c	1,5c	-13,6d	—
	<i>Terminalia ivorensis</i>	1,62	22,0b	4,1b	-8,0cd	—
	<i>Terminalia amazonia</i>	1,73	26,5b	4,8b	4,0c	0,7b
	<i>Eucalyptus deglupta</i>	1,53	-7,0d	—	-30,8e	—
Raíz	<i>E. poeppigiana</i>	2,19	25,2b	1,0c	20,6b	0,8b
	<i>Inga</i> spp.	1,38	22,8b	8,4a	19,6b	7,2a
	<i>T. ivorensis</i>	0,68	4,3c	13,0c	-15,3de	—
	<i>T. amazonia</i>	0,79	0,9c	0,3d	-16,3de	—
	<i>E. deglupta</i>	0,52	1,9c	0,7cd	-13,9d	—

Valores seguidos por la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Estos resultados confirman el efecto positivo de las leguminosas sobre la liberación de N en el suelo, pero también demuestran el comportamiento variable de estas; por ejemplo, se confirmó la velocidad baja de descomposición de la hojarasca de *Inga* spp. en relación con la baja concentración de N (1,72%). Palm y Sánchez (1991) obtuvieron resultados similares, confirmando que no todas las hojas de leguminosas se descomponen y mineralizan rápidamente el N. Dichos autores reportaron que la mineralización neta del N ocurre si la concentración de N de las mismas es superior a 2%; si la concentración es inferior a esta cifra, se produce la inmovilización. Estos resultados demuestran también que la introducción de maderables como *E. deglupta* podría conllevar a una reducción, por lo menos temporal, en la disponibilidad de N para los cafetos.

Producción de biomasa y extracción de N por el maíz en invernadero

La biomasa total y la extracción de N por el maíz en condiciones de invernadero (Fig. 1) confirman los resultados obtenidos en la caracterización de los suelos. Los suelos de Verde Vigor produjeron la menor biomasa de maíz con la menor extracción de N, acompañada de la más baja concentración de N en la biomasa (0,82%), lo cual podría estar relacionado con el menor contenido de

N mineral y el menor potencial de mineralización del N del suelo en Verde Vigor. Por el contrario, los suelos de Santa Fe produjeron la biomasa de maíz con la mayor concentración de N (1,07%), en conformidad con el mayor contenido de N mineral inicial y el mayor potencial de mineralización del N del suelo en Santa Fe.

Tanto en la producción de biomasa como en la extracción de N por el maíz, solamente los suelos provenientes del sitio San Pedro mostraron diferencias significativas entre los tipos de sombra (Fig. 1). El suelo bajo *E. poeppigiana* produjo una mayor biomasa total de maíz que los suelos bajo maderables. La biomasa producida con el suelo proveniente de la parcela con *Inga* spp. marcó una producción intermedia; no obstante, obtuvo el nivel máximo de extracción de N.

Aunque las especies leguminosas —especialmente *E. poeppigiana*—, mostraron un efecto positivo y significativo en la producción de maíz en San Pedro, el efecto parece ser mínimo en Verde Vigor. Es posible que este comportamiento se deba a la diferencia de edad entre las parcelas y a su manejo anterior. Las parcelas de Verde Vigor tienen solamente cuatro años de establecidas, mientras que las parcelas de San Pedro tienen seis años; además, *E. poeppigiana* estaba mejor establecido en San Pedro y había tenido un mayor

desarrollo foliar, durante un período más largo. Por lo tanto, *E. poeppigiana* en San Pedro ha podido contribuir más que en Verde Vigor al reciclaje de nutrientes, materia orgánica del suelo y fijación de nutrientes, entre otros.

Considerando solamente el sitio San Pedro, la producción de biomasa del maíz tuvo buenas correlaciones con las variables de calidad de los residuos de árboles de sombra, en particular con la concentración y liberación

de N en las raíces (Cuadro 5). Hubo poca correlación con las características de las hojas, debido probablemente al comportamiento de *Inga* spp., que liberó más N de los residuos de raíces que a partir de la hojarasca. La extracción de N por el maíz estuvo relacionada con el N liberado por las raíces de árboles y con dos variables del suelo influenciadas por las especies arbóreas: el contenido inicial de NO_3^- y el N potencialmente mineralizable (Cuadro 5).

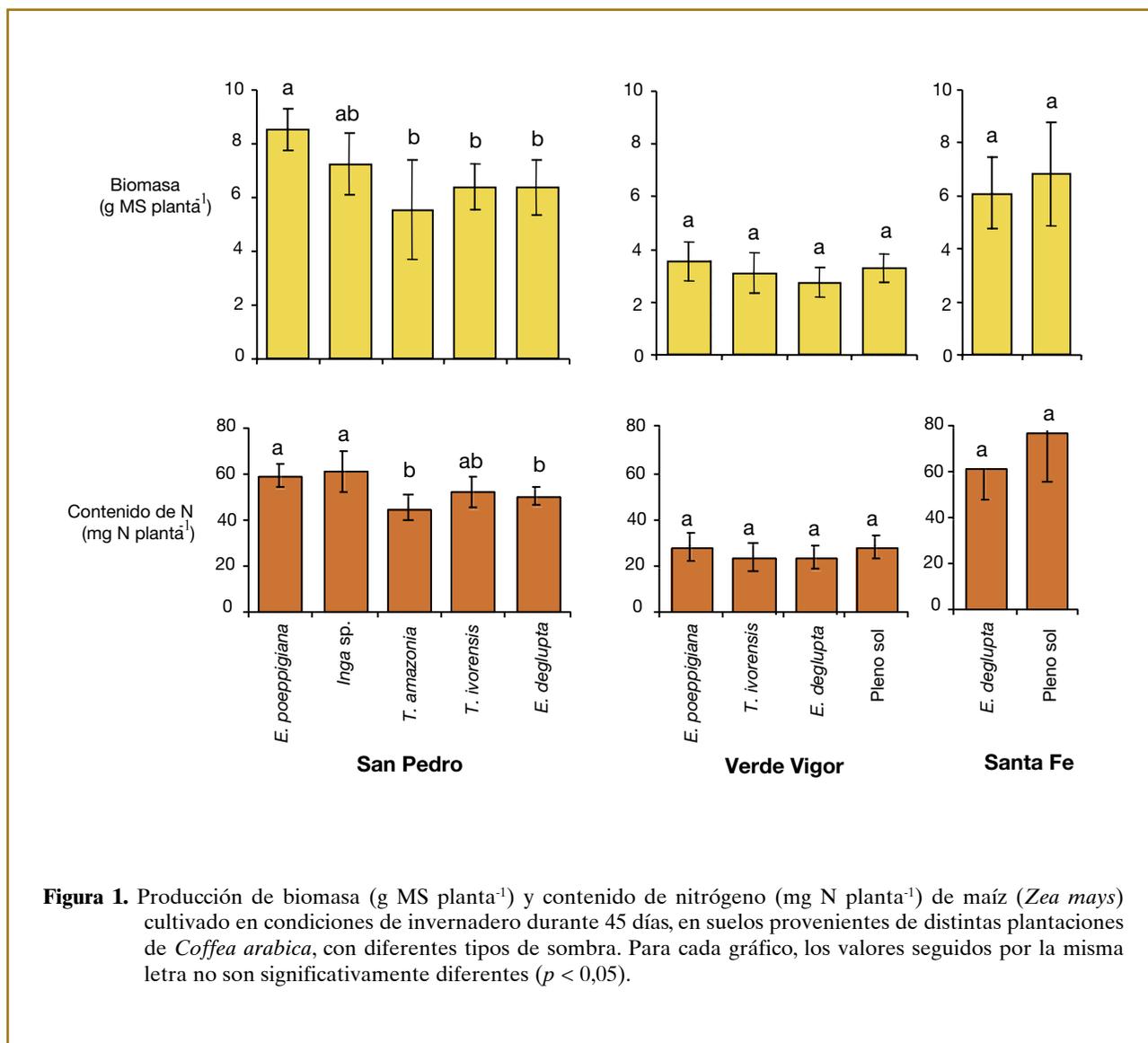


Figura 1. Producción de biomasa (g MS planta⁻¹) y contenido de nitrógeno (mg N planta⁻¹) de maíz (*Zea mays*) cultivado en condiciones de invernadero durante 45 días, en suelos provenientes de distintas plantaciones de *Coffea arabica*, con diferentes tipos de sombra. Para cada gráfico, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Cuadro 5. Correlaciones lineales entre la biomasa y el contenido de N del maíz (*Zea mays*) con la calidad de los residuos de árboles como las características químicas del suelo provenientes de San Pedro, Zona Sur de Costa Rica

Variable	Materia seca del maíz (g planta ⁻¹)			Contenido de nitrógeno del maíz (mg N planta ⁻¹)		
	Tallo	Raíz	Total	Tallo	Raíz	Total
N en hojas de árboles (%)	-ns-	0,95*	-ns-	-ns-	-ns-	-ns-
N en raíces de árboles (%)	0,95*	0,99**	0,93*	-ns-	-ns-	-ns-
N mineral liberado por hojas u hojarasca de árboles (mg N kg suelo ⁻¹)	-ns-	0,90*	-ns-	-ns-	-ns-	-ns-
N mineral liberado por raíces de árboles (mg N kg suelo ⁻¹)	0,93*	-ns-	0,92*	0,89*	0,95*	0,94*
N-NO ₃ ⁻ del suelo (mg N kg suelo ⁻¹)	-ns-	-ns-	-ns-	0,87*	0,93*	0,91*
N mineral del suelo (mg N kg suelo ⁻¹)	-ns-	-ns-	-ns-	-ns-	-ns-	-ns-
N potencialmente mineralizable del suelo (mg N kg suelo ⁻¹ d ⁻¹)	-ns-	0,95*	-ns-	0,87*	0,93*	0,91*

Nivel de significación de la correlación: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; ns =no significativo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Comparadas con los maderables *T. ivorensis*, *T. amazonia* y *E. deglupta*, las leguminosas *Inga* spp. y *E. poeppigiana* presentaron tasas más altas de liberación de N por sus raíces y hojas, e influenciaron positivamente el contenido de nitratos del suelo y el N potencialmente disponible del suelo, así como la producción de biomasa y la extracción de N por el maíz utilizado como indicador de fertilidad.
- La extracción de N por las plantas de maíz cultivadas en invernadero con suelos arenosos provenientes de sistemas de café con sombra estuvo positivamente correlacionada con las variables del suelo influenciadas por las especies arbóreas de sombra: NO₃⁻ inicial y N potencialmente mineralizable.
- Aunque la liberación de N por la hojarasca de *Inga* spp. no fue más alta que la de los maderables, sus raíces arrojaron la tasa de liberación de N más alta de todas las especies, inclusive comparada con *E. poeppigiana*. Esto enfatiza la necesidad de estudios complementarios sobre el ciclo del N en sistemas con *Inga* spp.
- La producción de biomasa y la extracción de N por el maíz cultivado en invernadero, así como el N potencialmente mineralizable, pueden ser utilizadas como indicadores del efecto de la especie de sombra sobre la disponibilidad de N en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CASCA (Sistemas Agroforestales de Café en América Central), INCO-DEV: ICA-CT-2001-10071, que cuenta con financiamiento de la Unión Europea a través del programa INCO.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Ávila, H; Harmand, JM; Dambrine, E; Jiménez, F; Beer, J; Oliver, R. 2004. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la zona sur de Costa Rica. Agroforestería en las Américas 41/42: 83-91.
- Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2 ed. Turrialba, CR, CATIE. 491 p. (Serie de materiales de enseñanza no. 29).
- Gutiérrez C, M. 2002. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.
- Mogollón, JP; Miragaya, GJ; Sánchez, LF; Chacón, NY; Araujo, J. 1997. Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. Agronomía Tropical 47 (1): 87-102.
- Morales, E; Beer, J. 1987. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. Agroforestería en las Américas 5(15-18): 44-48.
- Palm, CA; Sánchez, PA. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. Soil Biology and Biochemistry 23(1): 83-88.
- Tavares, CF; Beer, J; Jiménez, F; Schroth, G; Fonseca, C. 1999. Experiencia de agricultores de Costa Rica con la introducción de árboles maderables en plantaciones de café. Agroforestería en las Américas 6(23): 17-20.

Avances de Investigación

Comportamiento vegetativo y productivo de *Coffea arabica* a pleno sol y en tres sistemas agroforestales en condiciones subóptimas en Costa Rica¹

Jobert Angrand²; Philippe Vaast³; John Beer⁴; Tamara Benjamin⁴

Palabras claves: café; crecimiento; floración; fructificación; radiación fotosintéticamente activa.

RESUMEN

En condiciones subóptimas en el sur de Costa Rica (640 msnm), el desarrollo vegetativo de *Coffea arabica* cv. Costa Rica 95 fue mayor en los sistemas agroforestales (SAF) con los maderables *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* que en asociación con el árbol leguminoso no maderable *Erythrina poeppigiana* o a pleno sol, debido a que los maderables amortiguaron mejor el microclima. La floración del café se adelantó y el número de flores por nudo productivo fue superior a pleno sol que bajo sombra. Sin embargo, el número final de cerezas por nudo productivo fue superior bajo *E. deglupta* y *T. ivorensis*, debido a que la caída de cerezas es mayor a pleno sol o bajo *E. poeppigiana* (36 y 28%, respectivamente) que bajo sombra de *E. deglupta* o *T. ivorensis* (15 y 16%, respectivamente). En los SAF, la distancia del café al árbol de sombra no afectó significativamente el desarrollo vegetativo, la floración ni la fructificación del café. Las bandolas superiores de los cafetos tuvieron mayor crecimiento, una floración temprana y más cerezas por nudo productivo. El incremento inicial en peso por cereza fue mayor a pleno sol, pero se observó una tendencia a un mayor peso final de las cerezas en los tres sistemas sombreados.

Vegetative and productive behavior of *Coffea arabica* in full sun and in three agroforestry systems in a sub-optimal coffee zone of Costa Rica

Key words: Coffee; growth; flowering; fruiting; photosynthetically active radiation.

ABSTRACT

In sub-optimal conditions in Southern Costa Rica (640 masl), vegetative growth of *Coffea arabica* cv. Costa Rica 95 was superior in agroforestry systems (AFS) with timber trees (*Eucalyptus deglupta* or *Terminalia ivorensis*) than under the leguminous tree *Erythrina poeppigiana* or in full sun, due to the microclimatic buffering effect of shade from timber trees. Coffee flowering occurred earlier and the number of flowers per productive node was higher in full sun than under shade, but the final number of fruits per productive node was superior under *E. deglupta* or *T. ivorensis*, due to higher fruit drop in full sun or under *E. poeppigiana* (36 and 28%, respectively), compared to fruit drop under *E. deglupta* or *T. ivorensis* (15 and 16%, respectively). In AFS, distance of coffee plants to the shade tree had no significant effect on vegetative growth, flowering and fruiting intensity of the coffee. Branches higher up in the coffee canopy had higher growth, earlier flowering and higher fruit number per node. A higher initial increase in individual fruit weight was observed in full sun but the evolution of fruit development suggested a higher final individual fruit weight in shaded systems.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales (SAF) bien manejados son parte de la solución a la crisis actual de la rentabilidad del café (*Coffea* spp.), pues además de modificar positivamente el microambiente del cultivo y enriquecer el suelo en materia orgánica y nutrimentos (Beer et

al. 1998), pueden reducir los costos de producción y el uso de insumos agroquímicos, y proveer ingresos adicionales a la finca (Beer 1995, Somarriba 1999). Una sombra bien regulada puede reducir la incidencia de ciertas plagas, permitir una producción cafetalera

¹ Basado en Angrand, J.C. 2002. Floración, desarrollo vegetativo y fotosíntesis de *Coffea arabica* en diferentes sistemas de cultivos en Pérez Zeledón y Heredia, Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: angrandjobert@hotmail.com (autor para correspondencia).

³ Profesor-investigador, CIRAD asociado a CATIE, Sede Central. Correo electrónico: pvaast@catie.ac.cr

⁴ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: jbeer@catie.ac.cr; tamara@catie.ac.cr

estable y contribuir a una larga vida útil de la plantación (Staver *et al.* 2001, Vaast *et al.* 2002). Una sombra mal regulada puede resultar en una competencia excesiva entre los árboles y el café por nutrimentos, agua y radiación fotosintéticamente activa (Boyer 1968, Beer *et al.* 1998).

El funcionamiento fisiológico y las diferentes etapas fenológicas del café son influenciados por su ámbito de cultivo (Barradas y Fanjul 1986, Estivariz 1997, Siles y Vaast 2002). El presente trabajo comparó el desarrollo vegetativo, la floración y fructificación del café (*Coffea arabica*) a pleno sol y bajo tres especies de sombra en condiciones subóptimas de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el 2002 en la finca Verde Vigor, ubicada a 30 km al sur de la ciudad de San Isidro del General, Pérez Zeledón, Costa Rica (9°15', 83°30'; 640 msnm; 3800 mm año⁻¹; temperatura promedio anual de 26 °C). El suelo es un Ustoxic Palehumult con bajo pH (4,8 - 5,1) y baja fertilidad. Las mediciones se realizaron en el centro de parcelas experimentales (área total/parcela de 1152 m²; parcelas útiles de 432 m²) de *Coffea arabica* cv. Costa Rica 95, establecidas entre mayo y julio de 1998, en tres tipos de SAF: dos con las especies maderables *Eucalyptus deglupta* (eucalipto) o *Terminalia ivorensis* (terminalia) y uno con la leguminosa no maderable *Erythrina poeppigiana* (poró) (Kanten *et al.* 2004). Las parcelas de café a pleno sol (área total/parcela de 384 m²; parcelas útiles de 240 m²) se obtuvieron eliminando los árboles de *E. deglupta* en una parte de la plantación (febrero del 2000).

El café fue plantado a 2 x 1 m, con alta fertilización (200 kg N, 15 kg P₂O₅, 110 kg K₂O, 70 kg MgO, 5 kg B₂O, 50 kg S y 60 kg CaO ha⁻¹año⁻¹) y un elevado uso de fungicidas y herbicidas. Los árboles maderables fueron plantados en las hileras del café a una distancia de 6 x 6 m, y *E. poeppigiana* a una distancia de 8 x 8 m.

El diseño experimental utilizado en el presente estudio consideró solamente tres bloques completos de los cuatro tratamientos; las mediciones se hicieron alrededor de dos árboles escogidos al azar en cada parcela. En los SAF, se estudiaron cafetos distribuidos de manera sistemática; dos cafetos para cada una de cinco distancias del árbol de sombra (0,5; 1,5; 2,1; 2,5 y 3,2 m), lo cual resultó en 12 cafetos por distancia al árbol en cada SAF (es decir, tres bloques x dos árboles x dos cafetos por distancia), 60 cafetos medidos por cada SAF (cinco

distancias) y un total de 180 cafetos por medir en los tres SAF. Para las tres parcelas a pleno sol, cada punto de medición (dos por parcela) tuvo 10 cafetos (en total, 60 cafetos medidos a pleno sol).

Se midió la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) bajo la copa de los árboles alrededor del medio día, con un ceptómetro (Line Quantum Sensor, LI-COR), a una altura de 1,8 m, la cual sobrepasó la altura de las plantas de café. En cada parcela útil, se realizó un total de 48 mediciones en un mismo día, a diferentes distancias entre cafetos y maderables, en febrero (estación seca), mayo (transición entre estación seca y lluviosa) y septiembre (estación lluviosa) del 2002. Antes y al final de cada medición en los SAF, se midió la RAFA a pleno sol.

Al inicio de este estudio (enero 2002), se caracterizaron los árboles en las parcelas útiles: altura total, diámetro del tallo a la altura del pecho (dap), y proyección de copa, para calcular el porcentaje de área de influencia del árbol. Se midió un total de 36 árboles de cada especie maderable y 12 árboles de la leguminosa.

También durante los meses de enero, mayo y septiembre del 2002, se evaluó la altura, la proyección de la copa y el diámetro al cuello del tronco de los cafetos. Se midió el crecimiento vegetativo, la floración y el desarrollo de los frutos de café de siete bandolas (subdivisiones de las ramas del cafeto), seleccionadas sistemáticamente en siete estratos dentro de la copa del cafeto; cada cuatro estratos (nudos) en el tronco principal a partir del nudo ocho (posición 1). Se calculó el área foliar por nudo de café según la fórmula utilizada por Siles y Vaast (2002), que establece que esta (*A*) es igual al producto del número de hojas presentes (*N*) por el largo (*L*) y el ancho (*I*) de una hoja por cada nudo y del factor de conversión 0,7007; es decir:

$$A = N * L * I * 0,7007$$

Además, se calculó el incremento en el área foliar de los cafetos entre la primera medición (enero) y la última (septiembre).

Diez días después de cada lluvia, se hizo el conteo de todas las flores abiertas en las bandolas seleccionadas (entre el 22 de enero y el 15 de marzo del 2002). El peso fresco y seco de las cerezas de café fue medido cada dos meses, de junio a septiembre, a partir de muestras compuestas de una misma distancia del árbol

de sombra, para medir el aumento del peso durante el ciclo de producción.

El análisis estadístico se realizó con los programas Statistica (V5 edición 1997) y SAS (Statistical Analysis System, V8), usando un nivel de significancia del 5% y una comparación de promedios con las pruebas de *F* de Duncan y de Newman-Keuls.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rápido desarrollo de *E. deglupta* y *T. ivorensis* (Cuadro 1) confirmó los resultados de los estudios de Kapp *et al.* (1997), Dupuy y Mille (1993) y Amhed (1989) sobre el gran potencial de estas especies en condiciones de buena disponibilidad de agua y de temperatura elevada. En comparación con los datos obtenidos el año anterior en el mismo experimento (Siles y Vaast 2002), hubo un incremento anual del 24% en altura para *E. deglupta* y de 10% para *T. ivorensis*. El incremento en la proyección de la copa fue de 35% para *E. deglupta* y 17% para *T. ivorensis*. Esta última especie ocupó más del 100% de su área por árbol; es decir, las ramas se traslapaban. Asimismo, se notó que *E. deglupta* ocupó más del 90% de su área por árbol. Debido a un espaciamiento más ancho y una poda anual fuerte, *E. poeppigiana* ocupó solamente un 42%. Sin un manejo adecuado, este nivel de desarrollo de los maderables implica una tenaz competencia con los cafetos por la luz y los nutrientes disponibles (Beer *et al.* 1998).

Cuadro 1. Desarrollo de los árboles de sombra (cuatro años de edad) asociados con café en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica

Dimensiones arbóreas	<i>Eucalyptus deglupta</i>	<i>Terminalia ivorensis</i>	<i>Erythrina poeppigiana</i> ^(a)
Altura total (m)	9,7 b ^(y)	9,5 b	5,2 a
Dap (cm) ^(x)	11,3 a	16,8 b	18,3 b
Área proyectada de la copa (m ²)	33 b	44 c	27 a
Área ocupada por árbol (% sombreada) ^(y)	91 b	122 c	42 a

^(a) Podado una vez por año; ^(y) promedios con la(s) misma(s) letra(s) en la misma línea no son significativamente diferentes (prueba de Duncan; $\alpha = 0,05$); ^(x) diámetro del tallo a la altura del pecho; ^(y) a 6 x 6 m, cada maderable tiene 36 m², mientras que *E. poeppigiana* (8 x 8 m) tiene 64 m² por árbol.

En febrero hubo una mayor disponibilidad de RAFA en todos los sistemas, gracias a una menor nubosidad durante esta época, que por lo general es muy seca (Fig. 1). Además, los árboles de *T. ivorensis* y *E. deglupta*

presentaron menos hojas durante este período. Tras el inicio de la lluvia (finales de marzo), la RAFA bajo *T. ivorensis* fue menor en comparación con *E. deglupta* y *E. poeppigiana*, debido a que se inició un rebrote de follaje muy denso de esa especie. Entre los SAF, el nivel de RAFA más alto se registró bajo *E. poeppigiana*, por las podas anuales drásticas y los espaciamientos más anchos. *E. deglupta* proporcionó una sombra menos variable a lo largo del año, con una RAFA de 60% en la época lluviosa hasta 70% en la época seca. Muschler (2001) menciona que, en sitios subóptimos, una sombra con niveles intermedios (entre 40 y 80%) es lo más deseable y favorece la producción del café.

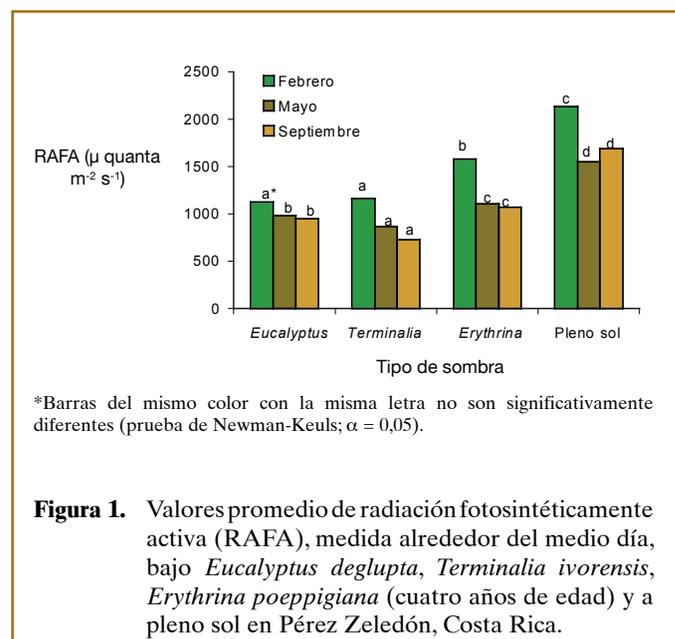


Figura 1. Valores promedio de radiación fotosintéticamente activa (RAFA), medida alrededor del medio día, bajo *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis*, *Erythrina poeppigiana* (cuatro años de edad) y a pleno sol en Pérez Zeledón, Costa Rica.

El rango de RAFA registrada en los SAF varió entre 728 $\mu\text{mola quanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bajo *T. ivorensis* en septiembre y 1578 $\mu\text{mola quanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bajo *E. poeppigiana* en febrero. En general, se ha observado una caída importante de la asimilación neta de *C. arabica* a niveles de RAFA superiores a 800 $\mu\text{mola quanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$ o temperaturas superiores a 27 °C (Kumar y Tieszen 1980). Cabe señalar que estas mediciones describen la situación del período del día con la radiación solar más alta, en comparación con lo registrado por Siles y Vaast (2002) al inicio y al final del día en el mismo ensayo durante el año anterior. Sin embargo, estas mediciones permiten analizar el papel de los árboles en la disminución de valores extremos de radiación incidente y temperatura (Boyer 1968, Beer *et al.* 1998).

Los mejores crecimientos en altura, largo no lignificado de bandolas, área foliar por bandola y diámetro al cuello

del tallo del cafeto fueron medidos en los SAF (Cuadro 2). Un área foliar máxima de 800 cm² por bandola se registró bajo *T. ivorensis*, siendo casi tres veces el valor a pleno sol. Con menos fluctuaciones de la RAFA y, por lo tanto, con un microambiente más regulado en el tiempo, las condiciones en SAF indujeron una mayor permanencia de hojas y un mayor desarrollo de los cafetos. Al contrario, el menor desarrollo vegetativo registrado a mayor exposición solar puede relacionarse con un mayor estrés de calor de estas plantas; por ejemplo, se registró una temperatura bastante alta (> 30 °C) en el microambiente de las hojas de café en las condiciones de Pérez Zeledón (Siles y Vaast 2002). Según Kumar y Tieszen (1980) y Rena *et al.* (1983), esta temperatura elevada influye negativamente sobre el desarrollo vegetativo y reproductivo del café a pleno sol. Un mejor amortiguamiento de los extremos de temperatura por parte de los árboles de sombra permite una mejor recuperación diaria de los cafetos en caso de estrés hídrico y calor. Lo anterior resulta en un aumento

de la asimilación neta total durante una gran parte del día (Siles y Vaast 2002), una larga permanencia de hojas (Boyer 1968), y un área foliar mayor por hoja (Aguilar 2000).

La floración comenzó al mismo tiempo en todos los tratamientos, pero fue más intensa en febrero a pleno sol (Cuadro 3). El número de flores por nudo productivo fue superior en plena exposición solar, como lo han reportado Boyer (1968), Cannell (1985) y Castillo y López (1966). No obstante, al inicio del período de maduración, el número de frutos por nudo productivo fue superior bajo *E. deglupta* y *T. ivorensis*, debido a que caen más frutos a plena exposición solar o bajo *E. poeppigiana* (36 y 28%, respectivamente) que bajo *E. deglupta* o *T. ivorensis* (15 y 16%, respectivamente). Además de la regulación del microambiente, la disponibilidad de nutrientes en estos sistemas puede contribuir a la mejor productividad (Beer *et al.* 1998).

Cuadro 2. Dimensiones de café (*Coffea arabica*) de cuatro años de edad en distintos tratamientos de sombra en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica

Dimensiones del café	Tipo de sombra			
	<i>Eucalyptus deglupta</i>	<i>Terminalia ivorensis</i>	<i>Erythrina poeppigiana</i>	Pleno sol
Altura (cm)	180 b	187 c	172 a	171 a ⁽²⁾
Diámetro al cuello del cafeto (mm)	29 b	31 c	29 b	27 a
Área de proyección de la copa (%)	70 c	74 d	67 b	62 a
Largo lignificado de bandola (cm)	39 c	38 c	29 b	25 a
Largo no lignificado de bandola (cm)	19 a	22 b	17 c	14 d
Área foliar por bandola (cm ²)	638 c	800 d	533 b	296 a
Incremento de área foliar (cm ² /8 meses)	292 c	368 d	236 b	136 a
Nudos totales por bandolas	21 a	20 a	21 a	21 a

⁽²⁾ Promedios con la(s) misma(s) letra(s) en la misma línea no son significativamente diferentes (prueba de Newman-Keuls; $\alpha = 0,05$).

Cuadro 3. Floración y producción de café (*Coffea arabica*) de cuatro años de edad en distintos tratamientos de sombra en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica

Variables de producción del cafeto	Tipo de sombra			
	<i>Eucalyptus deglupta</i>	<i>Terminalia ivorensis</i>	<i>Erythrina poeppigiana</i>	Pleno sol
Nudos productivos por bandola	9 b ⁽²⁾	8 a	7 a	7 a
Floración 1 (8/02/02; % del total)	19 a	18 a	20 ab	25 b
Floración 2 (22/02/02; % del total)	78 a	80 a	76 a	72 a
Floración 3 (15/03/02; % del total)	3 a	3 a	4 ab	3 ab
Flores por nudo productivo ⁽³⁾	10 a	10 a	10 a	11 b
Frutos por nudo productivo ⁽⁴⁾	8 b	8 b	6 a	6 a
Caída de frutos (%) ⁽⁵⁾	15 a	16 a	28 b	36 c

⁽²⁾ Promedios con la(s) misma(s) letra(s) en la misma línea no son significativamente diferentes (prueba de Newman-Keuls; $\alpha = 0,05$); ⁽³⁾ número total de flores al 25 de marzo (después de las tres floraciones); ⁽⁴⁾ número de frutos por nudo productivo 24 semanas después de la primera floración; ⁽⁵⁾ caída de frutos calculada 24 semanas después de la primera floración.

Una mayor distancia de los cafetos a los árboles de sombra no tuvo un efecto sobre el desarrollo vegetativo del cafeto. Sin embargo, Aguilar *et al.* (2001) encontraron un efecto negativo de la cercanía de los árboles de sombra en cafetos en la etapa de establecimiento (dos años de edad).

El número de flores y frutos por nudo productivo fue superior en bandolas más cercanas al ápice del cafeto (Cuadro 4; estratos 8, 12 y 16, es decir, posiciones 1, 2 y 3), consistente con los resultados de Boyer 1968, Jaramillo y Valencia 1980, y Cannell 1985, quienes han reportado un adelanto de la floración de las bandolas más expuestas en sistemas sombreados. Las bandolas que se encuentran en su primera o segunda producción son más productivas (Aguilar *et al.* 2001) que las más viejas y cercanas a la base del cafeto. Sin embargo, el desarrollo de ramificaciones secundarias y terciarias en estas bandolas inferiores permite mantener una productividad aceptable.

Los cafetos a pleno sol tuvieron un mayor peso por cereza 17 semanas después de la primera floración (Fig. 2); el incremento de peso de las cerezas de café en los SAF fue mayor entre las 17 y las 24 semanas. Según Wormer (1965), la cereza de café llega a su peso definitivo alrededor de 30 semanas después de la floración y necesita otras cuatro a cinco semanas para madurar. En el presente estudio, las mediciones cubrieron solo una parte del ciclo de crecimiento de las cerezas de café y

quizás por eso se encontraron mayores diferencias en el momento de la cosecha, como lo sugieren las curvas de evolución del peso. El adelanto de la floración y una maduración más temprana de las cerezas a pleno sol, debido a mayor exposición solar, han sido observados en otros estudios (Guyot *et al.* 1996, Vaast *et al.* 2002). Esta maduración adelantada puede afectar negativamente la calidad del café, no solamente en el tamaño y el peso definitivo de las cerezas, sino también en las características organolépticas del grano (Guyot *et al.* 1996, Muschler 2001). En el presente estudio, la distancia de los cafetos con respecto a los árboles asociados no influyó sobre el peso de las cerezas, resultado similar al de Estivariz (1997) bajo *Erythrina* spp.

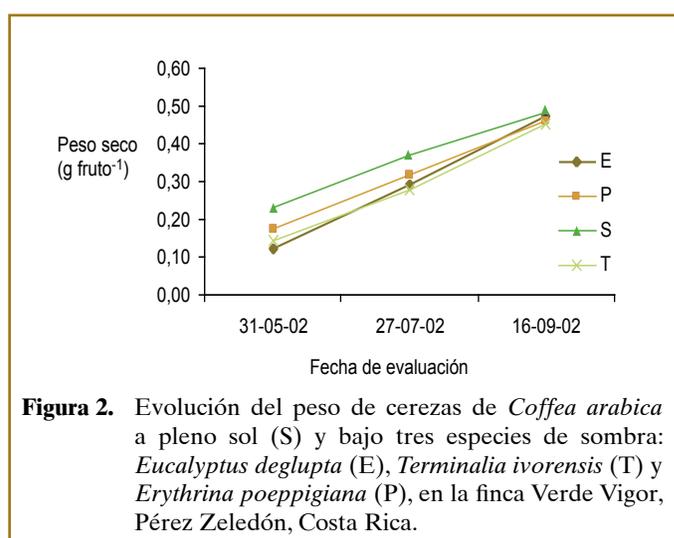


Figura 2. Evolución del peso de cerezas de *Coffea arabica* a pleno sol (S) y bajo tres especies de sombra: *Eucalyptus deglupta* (E), *Terminalia ivorensis* (T) y *Erythrina poeppigiana* (P), en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica.

Cuadro 4. Crecimiento, floración y producción de bandolas de *Coffea arabica*, de cuatro años de edad, en función de su posición en la copa, en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica

Variables de respuesta	Posición (estrato) de la bandola en la copa del café (ápice hacia base)						
	1	2	3	4	5	6	7
Largo lignificado de bandola (cm)	20 a ^(z)	30 b	36 c	38 cd	38 cd	39 cd	41 d
Largo no lignificado bandola (cm)	21 d	21 cd	21 cd	20 c	18 b	17 a	16 a
Área foliar de la bandola (cm ²)	468 a	583 b	678 bc	630 bc	624 bc	719 c	741 c
Incremento en área foliar (cm ² ; enero-septiembre)	215 a	267 b	311 bc	289 bc	283 bc	322 bc	333 c
Nudos totales (%)	11 a	14 b	19 c ^(z)	21 d	23 d	29 e	33 f
Nudos productivos (%)	5 a	7 b	8 c	9 c	8 c	9 c	9 c
Floración 1 (08/02/02; de la floración total)	33 b	21 ab	20 a	18 a	19 a	17 a	20 a
Floración 2 (22/02/02; de la floración total)	64 a	75 bc	76 bc	78 bc	77 bc	80 bc	78 b
Floración 3 (15/03/02; de la floración total)	3 a	4 ab	4 b	4 ab	4 ab	3 ab	3 a
Flores por nudo productivo (no.) ^(v)	12 c	11 b	10 b	9 a	9 a	9 a	8 a
Frutos por nudo productivo (no.) ^(x)	9 c	8 b	8 b	7 a	6 a	6 a	6 a
Caída de frutos (%) ^(w)	22 a	21 a	18 a	20 a	22 a	20 a	20 a

^(z) Valores con la(s) misma(s) letra(s) en la misma línea no son significativamente diferentes (prueba de Newman-Keuls; $\alpha=0,05$); ^(v) números totales de flores al 25 de marzo, después de las tres floraciones; ^(x) números de frutos por nudo productivo 24 semanas después de la primera floración; ^(w) caída de frutos calculada 24 semanas después de la primera floración.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La RAFA fue menos intensa bajo *T. ivorensis* en comparación con los demás SAF (*E. poeppigiana* y *E. deglupta*), y hubo menor fluctuación de RAFA durante el ciclo de producción bajo *E. deglupta*. Este fue asociado con un desarrollo vegetativo de los cafetos en los SAF con maderables superior que a pleno sol, lo cual influye de manera positiva sobre el próximo ciclo de producción del cafeto, al aumentar la disponibilidad de tejidos nuevos en la planta. Bajo *E. deglupta* hubo un mayor número de nudos productivos por bandola que bajo *T. ivorensis*, *E. poeppigiana* y pleno sol. La floración se adelantó en los cafetos y bandolas más expuestos a altos niveles de RAFA, y el número de flores promedio por nudo productivo fue mayor a pleno sol que en los SAF. Sin embargo, el número final de cerezas por nudo productivo fue mayor bajo *E. deglupta* y *T. ivorensis* que a pleno sol o bajo *E. poeppigiana*, debido a una menor tasa de caída de cerezas bajo los maderables. Hubo un incremento más temprano en el peso por cereza a pleno sol, pero la tendencia del desarrollo de cerezas sugiere un peso final por cereza más alto en los SAF.

Se concluye que en las condiciones subóptimas para *C. arabica* en la zona de este estudio, se puede recomendar la producción de café en SAF con maderables, ya que las condiciones climáticas permiten un buen desarrollo de los árboles y una productividad aceptable de café. Sin embargo, es aconsejable considerar raleos tempranos de los maderables

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al personal de la finca Verde Vigor por su apoyo en el manejo del experimento, y a la Comisión Europea por financiar parcialmente los equipos científicos a través del proyecto CASCA (ICA4-CT-2001-10071).

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aguilar, A. 2000. Evaluación de sistemas agroforestales con café asociado con *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* e implicaciones metodológicas. Tesis M.Sc. Turrialba, CR, CATIE. 73 p.
- Amhed, P. 1989. *Eucalyptus* in agroforestry: its effects on agricultural production and economics. *Agroforestry Systems* 8: 31-38.
- Barradas, V; Fanjul, L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38: 101-112.
- Beer, J. 1995. Efecto de los árboles de sombra sobre la sostenibilidad de un cafetal. *Promecafé* 68: 13-18.
- _____; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38: 139-164.
- Boyer, J. 1968. Influence de l'ombrage artificiel sur la croissance végétative, la floraison et la fructification des caféiers Robusta. *Café Cacao Thé XII*: (4): 302- 319.
- Cannell, MGR. 1985. Physiology of the coffee crop. In Clifford, NM; Willson, KC. eds. *Coffee: Botany, biochemistry and production of beans and beverage*. Londres, UK, Croom, Helm. p. 108-134.
- Castillo, J; López, R. 1966. Nota sobre el efecto de la intensidad de la luz en la floración del cafeto. *CENICAFE* 17: 51-59.
- Dupuy, B; Mille, G. 1993. Timber plantations in the humid tropic of Africa. Roma, IT, FAO. 190 p. (FAO Forestry Paper 98).
- Estivariz Coca, J. 1997. Efecto de sombra sobre la floración y producción de *Coffea arabica* var. Catura después de una poda completa en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 73 p.
- Guyot, B; Gueule, D; Manez, JC; Perriot, JJ; Giron, J; Villain, L. 1996. Influence de l'altitude et de l'ombrage sur la qualité des cafés arabica. *Plantation Recherche Développement* 272-283.
- Jaramillo, R; Valencia, A. 1980. Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L. en Chinchiná, Colombia. *CENICAFE* 127-143.
- Kanten, R; Beer, J; Schroth, G; Vaast, P. 2004. Interacciones competitivas entre *Coffea arabica* y árboles maderables de rápido crecimiento en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 41/42: 5-15.
- Kapp, GB; Beer, J; Lujan, R. 1997. Species and site selection for timber production on farm boundaries in the humid Atlantic lowlands of Costa Rica and Panama. *Agroforestry Systems* 35: 139-154.
- Kumar, D; Tieszen, LL. 1980. Photosynthesis in *Coffea arabica*: effects of light and temperature. *Experimental Agriculture* 16(1): 13-19.
- Muschler, R. 2001. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 51: 131-139.
- Rena, AB; Caldas, LS; Jonson, CE; Pereira, AA. 1983. Fotossíntese e o depauperamento de algunas progenies de café resistentes á ferrugem. In Poços de Caldas, MG. ed. *Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras* (10, 1983, Brasil). Anais. Río de Janeiro, BR, IBC. p. 171-172.
- Siles Gutiérrez, P; Vaast, P. 2002. Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* o sin sombra. *Agroforestería en las Américas* 9(35-36): 44-49.
- Somarriba, E. 1999. Sustainable timber production from uneven-aged shade stands of *Cordia alliodora* in small coffee farms. *Agroforestry Systems* 10: 253-263.
- Staver, C; Guharay, F; Monterosso, D; Muschler, RG. 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems* 53: 151-170.
- Vaast, Ph; Génard, M; Dauzat, J. 2002. Modeling the effects of fruit load, shade and plant water status on coffee berry growth and carbon partitioning at the branch level. In Dejong, TM. ed. *Proceedings of the Sixth International Symposium in Fruit Research and Orchard Management*. Acta Horticulturæ 584: 57-62.
- Wormer, TM. 1965. Some physiological problems of coffee cultivation in Kenya. *Kenyan Coffee* 6(2): 1-16.

Avances de Investigación

Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica¹

Hector Ávila²; Jean-Michel Harmand³; Etienne Dambrine⁴;
Francisco Jiménez⁵; John Beer⁵; Robert Oliver⁶

Palabras claves: adsorción de nitratos; agroforestería; café; escorrentía; lixiviación de N; Ultisol.

RESUMEN

En un Ultisol en la Zona Sur de Costa Rica (600 msnm y 2700 mm año⁻¹), en cafetales (*Coffea arabica*) a pleno sol y café bajo sombra de *Eucalyptus deglupta*, se evaluaron las tasas de mineralización y nitrificación del N del suelo, las pérdidas de N por escorrentía y lixiviación y el N mineral acumulado en el perfil del suelo. Las dos parcelas experimentales recibieron 180 kg N ha⁻¹ en el 2002 (año del estudio). *E. deglupta* no afectó la tasa de mineralización y nitrificación del N en la capa de suelo 0–20 cm. En pendientes menores al 11%, las pérdidas de N mineral por escorrentía no superan el 1% del fertilizante aplicado. *E. deglupta* incrementó la demanda evaporativa total del sistema y la absorción de nitratos durante la estación seca, dando como resultado una menor lixiviación de nitratos en este sistema. En los suelos de cafetales a pleno sol y bajo *E. deglupta*, la lixiviación de nitratos fue de 103 y 62 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ a 1,2 m y de 25 y 15 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ a 2 m de profundidad, respectivamente. Las concentraciones de N-NO₃ a 2 m de profundidad y en nacientes de microcuencas fueron muy similares y muy bajas (alrededor de 1,5 mg L⁻¹). La fuerte reducción en las concentraciones de N-NO₃ con la profundidad del suelo se debe a su adsorción por los coloides del suelo en las profundidades por debajo de 80 cm.

Nitrogen dynamics in a *Coffea arabica* - *Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica

Key words: Agroforestry; coffee; nitrate sorption; N leaching; N mineralisation; Ultisol.

ABSTRACT

Under full sun coffee (*Coffea arabica*) and coffee shaded with *Eucalyptus deglupta*, on an Ultisol in the southern zone of Costa Rica (600 masl and 2700 mm annual rainfall), soil N mineralisation and nitrification, N losses from the systems through run-off and leaching and soil NO₃ accumulation were evaluated. Both systems received 180 kg N ha⁻¹ as chemical fertilizer in 2002 (the study year). Soil N mineralization and nitrification in the 0-20 cm soil layer were not affected by *E. deglupta*. With gentle slopes (less than 11%), mineral N loss in surface runoff was very low (less than 1% of the fertilizer input). As a result of increased total evaporative demand and nitrate absorption by *E. deglupta* during the dry season, nitrate lixiviation was lower under coffee with *E. deglupta*. At 1.2 m soil depth, nitrate lixiviation was 103 and 62 kg N-NO₃ ha⁻¹ and at 2 m 25 and 15 kg N-NO₃ ha⁻¹ under full sun coffee and coffee with *E. deglupta*, respectively. NO₃-N concentrations in soil solution at 2 m soil depth and in spring water were similar and low (about 1.5 mg L⁻¹). The strong decrease in NO₃-N concentrations with depth in percolated water and the low N leaching were mainly attributed to nitrate adsorption in soil layers below 80 cm depth.

¹ Basado en Ávila Reyes, HE. 2002. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta*, en la zona sur de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE. 2002. Correo electrónico: avilah2002@yahoo.com

³ CIRAD-Forêt/CATIE, Sede Central. Correo electrónico: jean-michel.harmand@cirad.fr (autor para correspondencia).

⁴ INRA, Cycles biogeochimiques, Nancy, Francia. Correo electrónico: dambrine@nancy.inra.fr

⁵ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: fjimenez@catie.ac.cr; jbeer@catie.ac.cr

⁶ CIRAD, Montpellier, Francia. Correo electrónico: robert.oliver@cirad.fr

INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica*) es un cultivo de gran importancia económica en Costa Rica. Durante la década de los 70, el café se plantó en asocio con árboles de sombra. Sin embargo, en los años siguientes, con la introducción de cultivares de café más productivos (p. ej. Caturra), el uso de la sombra ha disminuido y el uso de fertilizantes químicos nitrogenados se ha incrementado (Babbar y Zak 1995). En zonas de baja altitud, donde la sombra es necesaria para tener condiciones micrometeorológicas apropiadas para el café, recientemente se ha impulsado la introducción de árboles maderables de valor comercial y de rápido crecimiento, como *Eucalyptus deglupta* (eucalipto), sustituyendo los árboles de sombra leguminosos de uso tradicional, como *Erythrina poeppigiana* (poró) e *Inga* spp. (guaba). Como árbol de sombra, *E. deglupta* puede competir con la planta de café por agua, especialmente en zonas con estación seca marcada (Kanten 2004) y por nutrientes, especialmente el N, por falta de fijación atmosférica, por absorción o, quizás, reduciendo la mineralización. Sin embargo, la inclusión de *E. deglupta* aumenta la producción de biomasa y la demanda evaporativa del sistema, lo que podría reducir las pérdidas de nitratos por lixiviación y la contaminación nitríca de los recursos hídricos (Renderos 2001). En este estudio, se compararon la tasa de mineralización del N del suelo, las pérdidas de N por escorrentía y lixiviación, la acumulación de nitratos en el perfil del suelo y la contaminación del agua freática por nitratos en cafetales a pleno sol y bajo *E. deglupta* en fincas comerciales de café, en una zona baja del sur de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El estudio se realizó en la finca Santa Fe, en el cantón de Pérez Zeledón (9°15' - 9°18'N, 83°31' - 83°36'O; 600 a 700 msnm; 2740 mm año⁻¹, 170 días de lluvia de abril a diciembre; temperatura media 23,5 °C; humedad relativa promedio de 87,5%). El suelo es un Ustic Palehumult de textura franco-arcillo-arenosa en las capas superficiales y arcillosa en las capas profundas (Renderos 2001). El contenido de C del suelo es de 6% y el pH varía entre 4,6 y 6,6. La finca mide 1000 ha y ocupa la parte alta de varias microcuencas.

Se escogieron dos plantaciones comerciales adyacentes (café con *E. deglupta* y café a pleno sol) con el café establecido en 1988 y la misma historia y manejo. *E. deglupta* fue plantado en 1995. En ambas plantaciones se escogió una parcela experimental de 1 ha. Dado que no había otro par de parcelas con las mismas condicio-

nes, no fue posible tener repeticiones. Desde el establecimiento del café en 1988 hasta el año 2000, se aplicaron 260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, distribuidos en tres aplicaciones. En el 2001, se aplicaron 124 kg N ha⁻¹, distribuidos en dos aplicaciones. En el 2002, la fertilización en las parcelas experimentales fue de 180 kg N ha⁻¹ (Nutrán: 16,5% de N-NO₃ y 16,5% de N-NH₄) y 135 kg ha⁻¹ de KCl, distribuidos en dos aplicaciones.

Metodología de toma de datos

La lluvia diaria se midió con un pluviómetro instalado a campo abierto entre las parcelas de café a pleno sol y café con *E. deglupta*. Para medir la escorrentía superficial se establecieron en cada parcela experimental, las cuales tienen pendientes de menos de 7%, tres subparcelas de escorrentía (1 m de ancho, 1 m de largo y 15 cm de altura). Las láminas metálicas para delimitar estas subparcelas se enterraron a 7,6 cm de profundidad. En la parte inferior de cada subparcela se instaló un recipiente de 30 litros de capacidad, para recolectar el agua de escorrentía después de cada lluvia. Además, se instalaron en otra parcela de café con *E. deglupta*, con pendientes de 33 a 50%, otras tres subparcelas de escorrentía, similares a las antes mencionadas (en esta última parcela, únicamente se midió escorrentía y pérdidas de N en la escorrentía).



Parcelas de escorrentía de 1 m² para medir pérdidas de N mineral por escorrentía superficial en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe de la Zona Sur de Costa Rica (foto: Héctor Ávila).



Lisímetros para medir lixiviación de nitratos a 30, 60, 120 y 200 cm de profundidad en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe de la Zona Sur de Costa Rica (foto: Jean Michel Harmand).



Tubos de incubación para medir la mineralización del N *in situ* en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe en la Zona Sur de Costa Rica (foto: Héctor Ávila).

En las dos parcelas principales se tomaron muestras de suelo, compuestas por tres submuestras, cada 10 cm hasta 200 cm de profundidad, para determinar su contenido de humedad. Se midió la humedad gravimétrica y la densidad aparente para convertir la humedad gravimétrica en humedad volumétrica. Se calculó el drenaje diario del suelo de abril a noviembre del 2002, utilizando la ecuación general del balance hídrico (Maraux y Rapidel 1990) descrita por el modelo siguiente (todas las variables tienen que ser expresadas en la misma unidad; p. ej., mm):

$$\text{Lluvia} = \text{ETR} + \text{Escorrentía} + \text{Drenaje} + \Delta S$$

Donde:

ETR = evapotranspiración.

Escorrentía = cantidad de agua que se perdió por escorrentía superficial.

Drenaje = lámina de agua que se perdió de una determinada profundidad del perfil del suelo, por percolación, cuando la humedad sobrepasa la capacidad del campo.

ΔS = variación del contenido de humedad del suelo entre dos fechas.

La capacidad de campo se determinó como la lámina de agua presente en el suelo el 29 de mayo (los días previos hubo suficiente lluvia). La ETR en el sistema café con *E. deglupta* se evaluó para el período del 2 de abril al 21 de mayo, utilizando la variación de humedad de suelo entre estas fechas y asumiendo una ausencia de drenaje, debido a que no cambió la humedad en las capas profundas (180-200 cm). Ese valor de ETR (4,4 mm día⁻¹) se utilizó para calcular el drenaje diario durante el período de estudio; se usó el mismo valor de ETR para ambos sistemas porque la plantación a pleno sol nunca cumplió con estos criterios en ningún período (siempre

hubo cambios temporales en la humedad del suelo en la capa 180-200 cm).

La mineralización se evaluó incubando muestras de suelo en condiciones de campo durante períodos de cuatro semanas, desde marzo hasta octubre del 2002. En cada sistema, se sacaron con un barreno cilíndrico de 8 cm de diámetro 24 muestras de suelo de manera aleatoria, en la capa 0-20 cm (seis pares dentro de las hileras y seis pares entre hileras de café) a 40 cm de las plantas de café y de 1,5 – 2,5 m de los árboles. Las muestras se tomaron en pares, a 30 cm de distancia entre cada una. Una de ellas se conservó en hieleras hasta su traslado al laboratorio para determinar el contenido inicial de N-NO₃ y N-NH₄ en el suelo. La otra muestra de cada par fue introducida cuidadosamente, para su incubación en el campo, en tubos PVC de 30 cm de largo y 8 cm de diámetro. El extremo inferior de los tubos fue sellado por una malla metálica de 100 μm, para impedir el acceso de las raíces a la muestra, pero sí permitir un equilibrio de la humedad entre el suelo y la muestra. Los tubos de incubación fueron enterrados en el mismo punto de muestreo, a la misma profundidad (0-20 cm). Quedaron 10 cm del tubo proyectados sobre la superficie del suelo; previamente, esta parte fue perforada en su costado con cuatro agujeros de 1 cm de diámetro para permitir la entrada de aire, necesario para la actividad de bacterias aeróbicas. El extremo superior de cada tubo se cubrió con un tapón de plástico para proteger la muestra del efecto de la lixiviación por lluvias.

Se midió la concentración de nitratos en la solución del suelo mediante cápsulas porosas lisimétricas. En cada parcela principal (café a pleno sol y café con *E. deglupta*), se instalaron las cápsulas a 30, 60 y 120 cm de profundidad, con seis repeticiones por parcela, y a 200 cm de profundidad con cuatro repeticiones por parcela. Esos lisímetros se colocaron de forma paralela a las hileras de café, entre 40 y 50 cm de los cafetos, con una distancia entre ellos de 30 a 40 cm, y en el caso de la parcela con *E. deglupta*, a una distancia entre 1,5 y 2,5 m de los árboles. Las extracciones del agua de lixiviación se realizaron cada 10 días, entre el 6 mayo y el 28 de noviembre del 2002. Para determinar las pérdidas de nitratos, se multiplicó su concentración en la solución del suelo por el drenaje calculado durante el mismo período. Asimismo, se realizaron 13 muestreos de agua durante el período de marzo a septiembre del 2002, en ocho nacientes alrededor de las parcelas estudiadas, en seguimiento a muestreos hechos por Renderos (2001). La determinación de N-NH₄ y N-NO₃ en muestras de

agua provenientes de nacientes y lisímetros se realizó mediante colorimetría.

La densidad aparente se consideró para evaluar la acumulación de nitratos en el perfil del suelo al final de la estación seca (02/04/2002). En cada parcela principal, se tomaron tres muestras de suelo a profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y luego cada 20 cm hasta los 200 cm. Cada muestra estaba compuesta por tres submuestras, identificando un punto aleatorio para la primera submuestra y tomando las siguientes a 50 cm de distancia una de la otra. Este muestreo se hizo a 40 cm de la línea de café y, en el caso de la parcela con *E. deglupta*, a 1,5 m de un árbol.

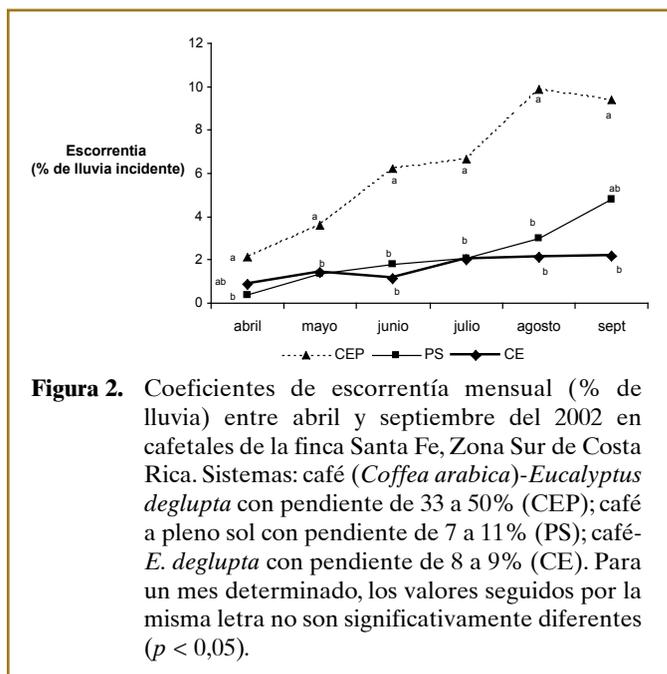
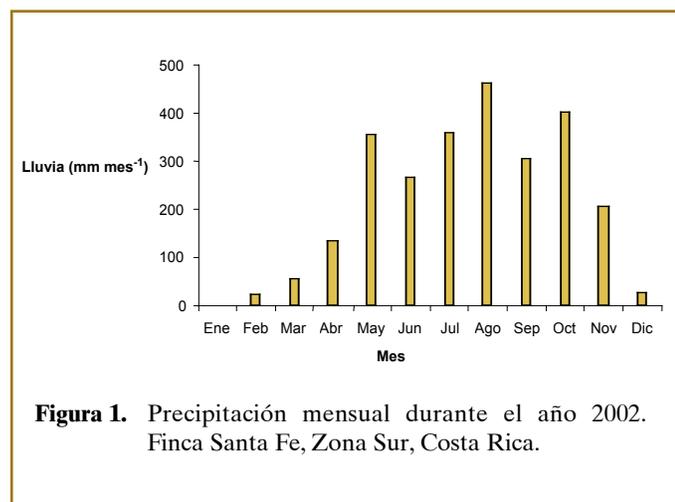
Para la extracción de las formas inorgánicas de N del perfil del suelo, se utilizó el K_2SO_4 2N. La determinación de $N-NH_4$ y $N-NO_3$ se realizó por destilación, en extractos de suelo, utilizando MgO como base débil y aleación Devarda como agente reductor. También se midió el pH y el contenido de Cl^- de los suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujos de agua

Lluvia y escorrentía

Durante el período de estudio, la precipitación inició en febrero y fue muy baja hasta el mes de abril. Entre mayo y noviembre, la precipitación varió entre 200 y 460 mm mes^{-1} (Fig. 1). Los coeficientes de escorrentía (% de lluvia) fueron bajos al inicio de las lluvias y se incrementaron con el progreso de la época lluviosa (Fig. 2), como fue observado por Vahrson y Palacios (1993).



Considerando todo el período de abril a septiembre, la escorrentía fue de 2,5 y 1,7% del total de la lluvia en café a pleno sol y bajo *E. deglupta*, respectivamente (con pendientes menores al 11%). Este coeficiente aumentó significativamente al 6,8% en el sistema café-*E. deglupta* con pendiente entre 33 y 51%. Una mayor intercepción de lluvia y capa de mantillo en el sistema con *E. deglupta* puede explicar la mayor escorrentía en cafetales sin árboles en parcelas con la misma pendiente. Se observó una relación lineal positiva entre la pendiente del terreno y el coeficiente de escorrentía en el sistema café-*E. deglupta* ($r^2 = 0,92$ y $p = 0,002$). Lal (1989) encontró coeficientes de escorrentía de 2,4 a 4,9% en cultivos en callejones de maíz con *Leucaena* spp. y *Gliricidia sepium*, con pendiente del 7%. Romero (1991) encontró valores de 3,7 y 5,4% en parcelas de café con obras de conservación de suelos, mientras que Tineo (1993) y Lebeuf (1993) encontraron coeficientes de escorrentía menores al 1% en parcelas con cultivos en callejones (15% de pendiente).

Variación en la humedad del suelo

El contenido de agua en la capa de suelo (0-120 cm) al final de la estación seca fue significativamente mayor en el sistema de café a pleno sol que bajo sombra de *E. deglupta* (Fig. 3). Sin embargo, la humedad del suelo fue muy similar en ambos sistemas aproximadamente un mes después del inicio de las lluvias (21/05/02). Durante la estación lluviosa (muestreos del 22 de agosto y 29 de septiembre), se marcó una tendencia consistente de mayor humedad bajo el sistema café con *E. deglupta*

en todo el perfil del suelo (aunque no se presentaron diferencias significativas). La reducción de la humedad del suelo en el sistema café bajo sombra de *E. deglupta* durante la estación seca pudo haberse debido a incrementos en la evapotranspiración por los árboles (Kanten *et al.* 2004). En cambio, la situación se invirtió en la estación lluviosa, posiblemente debido a una mayor infiltración a través de las raíces de los árboles, por la presencia de más mantillo y por la menor densidad existente en los horizontes profundos del suelo en el sistema café-*E. deglupta*, lo cual permite una mayor capacidad de retención de agua.

Drenaje interno del suelo

Las pérdidas de agua pluvial por percolación durante el año 2002 fueron estimadas en 1265 mm en café-*E. deglupta* y en 1331 mm en café a pleno sol. La diferencia entre los dos sistemas se debe principalmente a la escorrentía y la recarga de la reserva de agua del suelo. En todo caso, hay que tener presente que se utilizó el mismo valor de ETR para ambos sistemas y para todo el período evaluado, lo que podría sobrestimar o subestimar el valor diario real de ETR y, con ello, el resultado del balance hídrico. Sin embargo, estos valores son pequeños y su precisión no afecta el total de drenaje acumulado durante el período de estudio.

Dinámica del nitrógeno

Mineralización del N del suelo

No se presentaron diferencias significativas de mineralización entre cafetales a pleno sol y café con *E. deglupta* (133 y 147 kg N ha⁻¹, respectivamente; Fig. 4). Al final de la estación seca e inicio de la estación lluviosa (primer período de incubación, marzo-abril), la tasa neta de mineralización fue negativa o nula (Fig. 4b). Eso concordó con una disminución de nitratos en el suelo (Fig. 4a). Durante este período se humectó el suelo en los tubos de incubación, pero con un contenido inicial de N-NO₃ de entre 10 y 25 mg kg⁻¹ de suelo, pudieron ocurrir pérdidas en forma de N₂O por desnitrificación (Gutiérrez 2002) y, posiblemente, inmovilización del N mineral. En contraste, Bertsch (1995) y Reynolds-Vargas *et al.* (1994) encontraron mineralización al inicio de las lluvias. Las diferencias entre sistemas en la concentración de nitratos del suelo (Fig. 4a) al final de la estación seca e inicio de la lluviosa se atribuyen a una mayor absorción de nitratos por el sistema café-*E. deglupta*, descartando la posibilidad de que existiera un efecto inhibitorio por los árboles de *E. deglupta* sobre la mineralización del N del suelo (Fig. 4b).

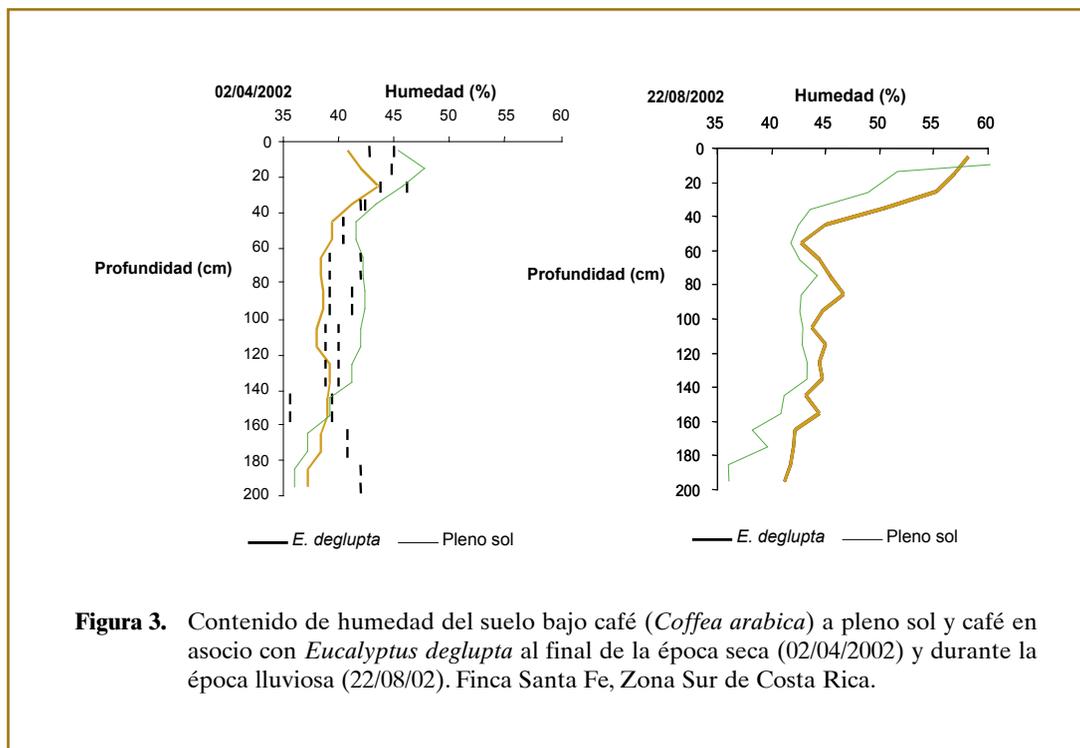
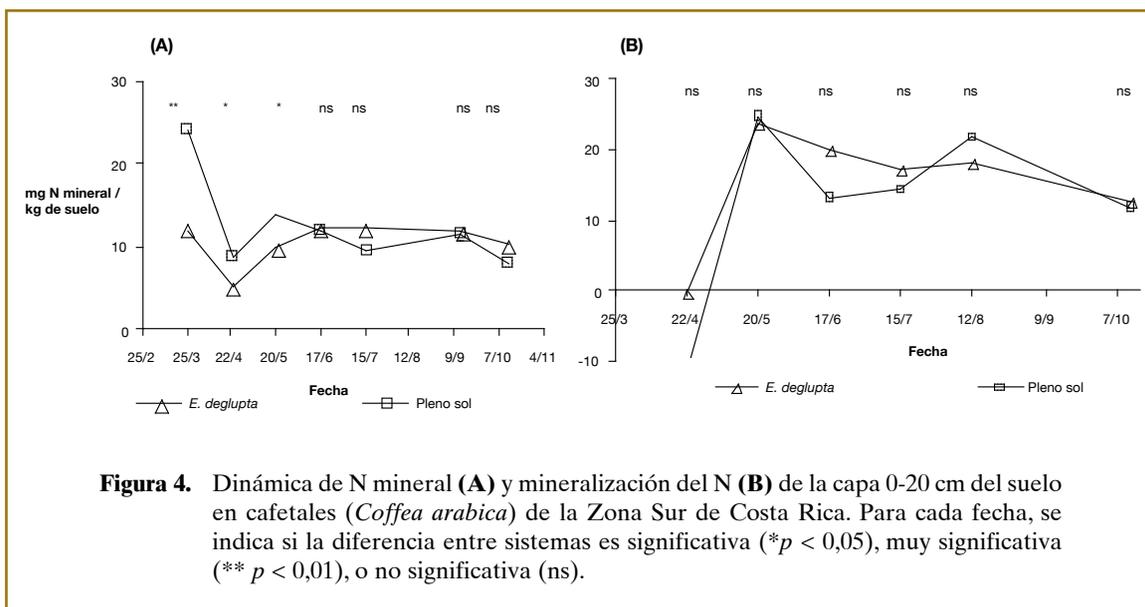


Figura 3. Contenido de humedad del suelo bajo café (*Coffea arabica*) a pleno sol y café en asocio con *Eucalyptus deglupta* al final de la época seca (02/04/2002) y durante la época lluviosa (22/08/02). Finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica.



Pérdidas de N mineral por escorrentía

Las pérdidas de N mineral en el agua de escorrentía fueron bajas con relación al aporte del fertilizante (Cuadro 1). Las pérdidas en el sistema café-*E. deglupta* con mayor pendiente (33-51%) fueron significativamente mayores que a pleno sol y bajo *E. deglupta* con pendientes de 8 a 9%. El efecto de la fertilización en el aumento de la concentración de N mineral en el agua de escorrentía superficial ocurrió en los primeros ocho días subsiguientes a la aplicación (Ávila 2002).

Lindau *et al.* (1996) encontraron que alrededor del 3-4% del N aplicado en campos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Inceptisoles fue removido por la escorrentía superficial. Estrada *et al.* (2001) encontraron pérdidas del 3% en cultivos de hortalizas en Vertisoles. En general, las pérdidas de N del suelo por escorrentía son pequeñas, excepto cuando esta se produce poco después de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados (Ramos y Ocio 1992).

Concentración de nitratos en nacientes de microcuencas

Las concentraciones de N-NO₃ en las nacientes fue muy estable durante el período de marzo del 2001 (Renderos 2001) a septiembre del 2002, con un valor promedio de 1,5 mg L⁻¹, excepto en dos fechas (mayo del 2001 y agosto del 2002), cuando se presentaron valores de 2,5 y 5,7 mg L⁻¹, respectivamente. Todos estos valores son inferiores a los indicados como críticos para el agua de consumo humano, según lo estipulado por la Organización Mundial de la Salud.

Concentraciones de nitratos en la solución del suelo

Las mayores concentraciones de nitratos en la solución del suelo se presentaron en ambos sistemas a los 30 y 60 cm de profundidad (Fig. 5), una zona explorable por las raíces del café y de los árboles. A las profundidades de 120 cm, y especialmente 200 cm, las concentraciones fueron muy bajas. Esto indica que existen mecanismos de retención de nitratos en estos suelos que impiden su rápida lixiviación y explicaría las bajas concentraciones de nitratos encontradas en aguas de las nacientes de la finca.

Cuadro 1. Aporte de fertilizante nitrogenado y pérdidas de N mineral por escorrentía superficial, en cafetales (*Coffea arabica*) con y sin *Eucalyptus deglupta* en la finca Santa Fe, Zona Sur, Costa Rica (abril-septiembre, 2002)

Sistema	Pendiente del terreno (%)	Aporte de (kg N ha ⁻¹) ^(a)	Pérdida	
			(kg N ha ⁻¹)	% del aporte
Café- <i>E. deglupta</i>	33 a 51	233	4,70	2,0 a ^(v)
Café- <i>E. deglupta</i>	8-9	233	0,76	0,3 b
Café a pleno sol	7-11	233	0,71	0,3 b

^(a) Aporte restringido a las parcelitas de escorrentía.
^(v) Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

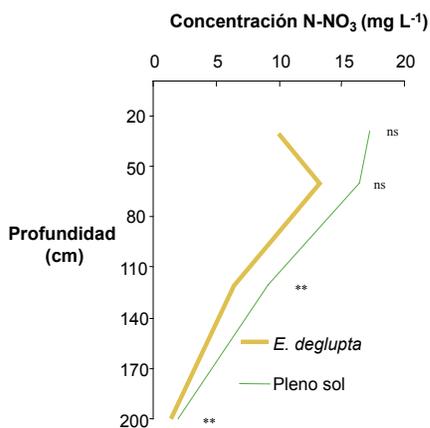


Figura 5. Concentraciones medias de nitratos en la solución del suelo en cafetales (*Coffea arabica*) con y sin *Eucalyptus deglupta* de la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica, entre 06/06/2002 y 28/11/2002. ns = no significativo; ** = $p \leq 0,01$.

Pérdidas de nitratos del suelo por lixiviación

Las pérdidas de nitratos por lixiviación fueron mayores en el sistema de café a pleno sol que con *E. deglupta* (Cuadro 2). Esta diferencia resulta de la concentración de nitratos en el agua de lixiviación, que fue un poco más alta en el sistema café a pleno sol (lo que podría resultar de una menor absorción por este sistema).

A la profundidad de 60 cm del suelo se estimó una lixiviación anual de nitratos superior al aporte anual de fertilizante. A los 120 cm ocurrió una lixiviación del 57% del aporte anual del fertilizante en el café a pleno sol y 34% bajo sombra de *E. deglupta*. La reducción en el flujo de nitratos de 120 a 200 cm se atribuye más a adsorción por los coloides del suelo que a la extracción por las plantas.

Acumulación de N mineral en el suelo

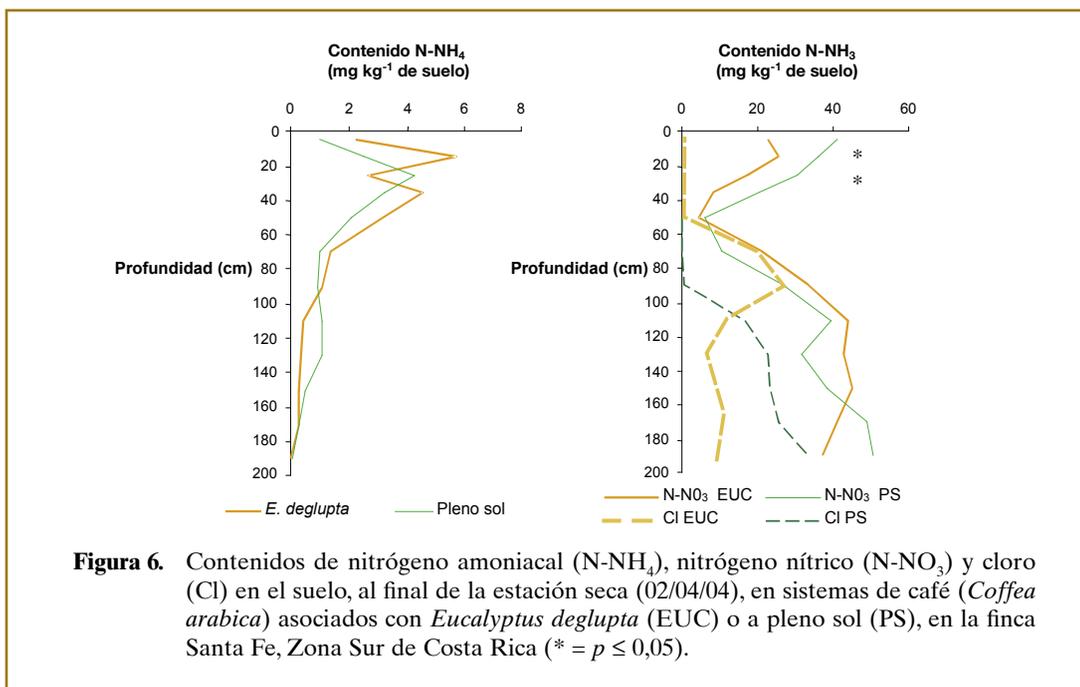
Al fin de la estación seca no hubo diferencias significativas en los contenidos de amonio del suelo entre los dos sistemas (Fig. 6). El amonio se acumuló (hasta 6 mg de N-NH₄ kg⁻¹ de suelo) en los primeros 50 cm del suelo. En las capas inferiores, las concentraciones fueron muy bajas (< 0,22 mg N kg⁻¹ de suelo). Se observó una acumulación de nitratos en la capa superficial del suelo (0-40 cm) con valores para café a pleno sol significativamente mayores que bajo *E. deglupta*. Los contenidos disminuyeron hasta 50 cm de profundidad en ambos sistemas. Por debajo de 120 cm, los valores se mantuvieron altos (promedios de 50 mg N kg⁻¹ de suelo), sin diferencias significativas entre los sistemas. Los altos contenidos de cloruros en el suelo, por debajo de 60 cm de profundidad en el caso de café con *E. deglupta* y por debajo de 90 cm en café en pleno sol, corresponden a los aportes de KCl en la fertilización de los años anteriores.

Los contenidos de nitratos y de cloruro se incrementan al mismo tiempo por debajo de los 60 cm. Eso significa que la acumulación de nitratos proviene, al menos en parte, de la fertilización nitrogenada. La acumulación de nitratos arriba de los 50 cm sería más un resultado de la mineralización del N orgánico del suelo, que ocurrió al final de la estación lluviosa y durante la estación seca.

En la capa de suelo 0 a 60 cm en café a pleno sol se acumularon cerca de 50 kg de N ha⁻¹ más que bajo *E. deglupta* (Cuadro 3). En la capa de 120 a 200 cm se acumularon más de 330 kg N ha⁻¹ en ambos sistemas, lo que representa 4 y 7 veces la diferencia de flujo anual de nitratos entre las profundidades de 120 y 200 cm en café a pleno sol (78 kg N ha⁻¹ año⁻¹) y bajo *E. deglupta* (46 kg N ha⁻¹ año⁻¹), respectivamente.

Cuadro 2. Flujos de nitratos a diferentes profundidades en el suelo en cafetales (*Coffea arabica*) con y sin *Eucalyptus deglupta* en la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica (2002)

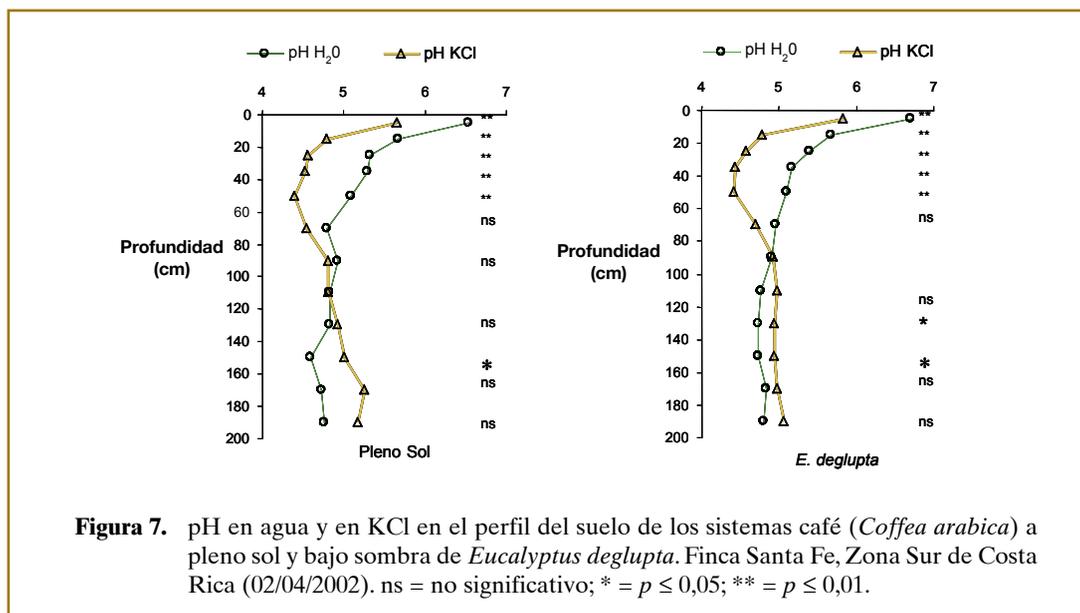
Profundidad (cm)	kg N-NO ₃ ha ⁻¹ año ⁻¹		% del N aplicado	
	Café a pleno sol	Café- <i>E. deglupta</i>	Café a pleno sol	Café- <i>E. deglupta</i>
60	250	186	139	103
120	103	62	57	34
200	25	15	14	8



En la Fig. 7 se muestran los valores de pH en el suelo en extracciones con agua y con KCl. Se observa que el pH en agua disminuye de 6,7 en la superficie hasta 4,8 a la profundidad de 200 cm. A la profundidad de 100 cm, se llegó al punto de carga cero (PCC); es decir, el valor por encima del cual el complejo coloidal del suelo tiene un valor negativo (pH KCl < pH agua). Por debajo de esta profundidad, el complejo coloidal tiene valor positivo (pH KCl > pH agua), razón por la cual puede retener aniones intercambiables (Fassbender y Bornemisza 1987).

Cuadro 3. Acumulación de N-NO₃ en el perfil del suelo de cafetales (*Coffea arabica*), con y sin *Eucalyptus deglupta*, al final de la estación seca en la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica (02/04/02)

Profundidad (cm)	Café a pleno sol (kg N-NO ₃ ha ⁻¹)	Café-E. Deglupta (kg N-NO ₃ ha ⁻¹)
0-60	115	68
60-120	164	200
120-200	331	330
Total	610	598



CONCLUSIONES

En pendientes menores ($\leq 11\%$), las pérdidas de agua por escorrentía fueron similares en sistemas de café a pleno sol y bajo *E. deglupta* ($\approx 2\%$). El contenido de agua en el suelo al final de la estación seca fue mayor en el cafetal a pleno sol, probablemente debido a que *E. deglupta* incrementó la demanda evaporativa total del sistema. Por el contrario, la humedad del suelo fue mayor en el sistema café con *E. deglupta* en medio de la estación lluviosa. La presencia de *E. deglupta* (siete años de edad) como árbol de sombra en plantaciones de café no afectó la tasa de mineralización y nitrificación del N del suelo. La concentración de nitratos en la solución del suelo tendió a ser menor en café con *E. deglupta*, lo que indica que los árboles reducen la disponibilidad de N para el café, pero también reduce la contaminación de aguas freáticas por lixiviación. La lixiviación de nitratos a 1,2 m de profundidad fue de 103 y 62 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ en café a pleno sol y bajo *E. deglupta*, respectivamente, y de 25 y 15 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ a 2 m de profundidad. La diferencia de flujos (lixiviación de nitratos) entre esas profundidades es atribuida a procesos de adsorción por los coloides del suelo, reduciendo con ello la contaminación de los recursos hídricos. Entre 1,2 y 2,0 m de profundidad del suelo, se encontró una acumulación de N mineral mayor a los 300 kg ha⁻¹, que es equivalente al flujo de nitratos (acumulado) de cuatro a siete años.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CASCA (Sistemas Agroforestales de Café en América Central), INCO-DEV: ICA-CT-2001-10071, que cuenta con financiamiento de la Unión Europea a través del programa INCO.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Ávila R, HE. 2002. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la zona sur de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 87 p.
- Babbar, LI; Zak, DR. 1995. Nitrogen loss from coffee agroecosystem in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *Journal of Environmental Quality* 24 (2): 227-233.
- Bertsch, F. 1995. Fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR, Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo. 45 p.
- Estrada B, MA; Nikolskii, GI; Reyes, FG; Etchevers B, JD; Palacios V, OL. 2001. Balance del nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo. *Terra* 20: 189-198.
- Fassbender, HW; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA. 420 p. (Colección de Libros y Materiales Educativos no. 81).
- Gutiérrez, CM. 2002. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 62 p.
- Kanten van, RF; Beer, J; Schroth, Göt; Vaast, P. 2004. Interacciones competitivas entre *Coffea arabica* y árboles maderables de rápido crecimiento en Pérez Zeledón, Turrialba. *Agroforestería en las Américas* 11(41-42). *Este volumen*.
- Lal, R. 1989. Agroforestry system and soil surface management of a Tropical Alfisol. *Agroforestry Systems* 8: 97-111.
- Lebeuf, LTI. 1993. Sistema agroforestal con *Erythrina fusca* Lour. en tierras de ladera: efectos en la pérdida de suelo, escorrentía superficial y producción de cultivos anuales. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 112 p.
- Lindau, CW; Delaune, RD; Alford, DP. 1997. Monitoring nitrogen pollution from sugarcane runoff using ¹⁵N analysis. *Water, Air and Soil Pollution* 89: 389-399.
- Maraux, F; Rapidel, B. 1990. La simulación del balance hídrico: aplicación para la determinación de fechas de siembra. Proyecto Regional de Agrometeorología, CATIE-CIRAD-ORSTOM. Turrialba, CR, CATIE. 31 p.
- Ramos, MC; Ocio, JA. 1992. La agricultura y la contaminación de las aguas por nitrato. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, ES. 32 p. (Hojas divulgadoras no. 7/92).
- Renders V, 2001. Efectos residuales de nitratos de suelos agrícolas sobre la contaminación del agua en microcuencas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 51 p.
- Reynolds-Vargas, JS; Ritcher, DD; Bornemisza, E. 1994. Environmental impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized Andisols in the Valle Central of Costa Rica. *Soil Science* 157(52): 289-299.
- Romero Del Valle, EG. 1991. Evaluación de las medidas demostrativas de conservación de suelo en la finca "La Selva", Cuenca del Río Tuis, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 106 p.
- Tineo, AL. 1993. Erosión hídrica, lixiviación y balance de N, P, K, Ca, y Mg, en una rotación frijol-maíz con prácticas agronómicas de conservación de suelos, en tierras de ladera, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 134 p.
- Vahrson, WG, Palacios, G. 1993. Datos complementarios de erosión, escorrentía y pérdidas de nutrientes en Cerbatana de Puriscal: resultados 1991. *Agronomía Costarricense* 17(2): 95-98.

Artículos invitados

Cuantificación del carbono radicular de *Erythrina poeppigiana* de cuatro y diez años establecidos en callejones en Costa Rica¹

Maren Oelbermann²; Paul Voroney³; Andrea Schlönvoigt⁴

Palabras claves: carbono del suelo; distribución radicular; materia orgánica; secuestro de carbono.

RESUMEN

La producción primaria neta anual de las raíces puede ser una contribución importante a la dotación de carbón (C) orgánico del suelo, gracias a la exudación y renovación de raíces finas. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el C radicular y los incrementos anuales de C radicular en árboles de *Erythrina poeppigiana* de diez y cuatro años en un sistema de cultivo en callejones. El C total de las raíces gruesas ($d > 5$ mm) de *E. poeppigiana*, hasta 60 cm de profundidad, fue de 4527 y 3667 kg ha⁻¹, con la asignación del 9 y el 22% del C total del árbol al sistema radicular para árboles de diez y cuatro años, respectivamente. Los árboles de diez años tuvieron el mayor incremento de C en raíces (240 kg ha⁻¹ año⁻¹) entre 0-20 cm; para los árboles de cuatro años fue entre 20-40 cm (510 kg ha⁻¹ año⁻¹). La mayor proporción de C en raíces en los 0-20 cm superiores, en el caso de los árboles más viejos, podría deberse a que en el momento de su plantación el suelo era pobre en nutrientes, lo cual hizo que las raíces exploraran las capas superiores del suelo. Cuando se plantaron los árboles más jóvenes, el suelo ya no era tan pobre, debido a los aportes de residuos de podas de árboles y de los cultivos, permitiendo a las raíces la explotación de capas más profundas (20-40 cm). La competencia entre árboles ya establecidos y árboles nuevos también puede haber contribuido a esta diferencia.

Quantification of carbon in roots of four and ten year old *Erythrina poeppigiana* in alley cropping in Costa Rica

Key words: Carbon sequestration; organic matter; soil carbon; root distribution.

ABSTRACT

Total structural root C ($d > 5$ mm) of *Erythrina poeppigiana* in a Costa Rican alley cropping system, to 60 cm depth, was 4527 and 3667 kg ha⁻¹ with 9 and 22% of total tree C allocated to the root system for ten and four year old trees, respectively. Ten year old trees had the highest C increment in roots (240 kg ha⁻¹ year⁻¹) in the top 20 cm of the soil while for four year old trees this occurred at depths of 20-40 cm (510 kg ha⁻¹ year⁻¹). The larger proportion of root C in the top 20 cm, for the ten year old trees, may have occurred because at the time of tree planting, soils were nutrient poor, causing tree roots to explore upper soil horizons. At the time of planting younger trees, soils were more fertile because of the contributions of residues from tree pruning and from crops, allowing roots to exploit lower soil horizons (20-40 cm). Competition between roots of established trees with recently planted trees may also explain this result.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas radiculares constituyen la interfase entre la planta y el suelo. La producción primaria neta anual de las raíces puede ser una contribución importante a

la dotación de carbón (C) orgánico del suelo, gracias a la exudación y renovación de raíces finas (Balesdent y Balabane 1996). Yamoah *et al.* (1986), Schroth y

¹ Basado en: Oelbermann, M. 2002. Linking carbon inputs to sustainable agriculture in Canadian and Costa Rican Agroforestry Systems. Ph.D. Thesis, Department of Land Resource Science, University of Guelph, Canada. Traducido por Gabriela Gitli, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² Ph.D. en Agroforestería Tropical. University of Waterloo, Waterloo, ON N2L 3G1. Correo electrónico: moelberm@sciborg.uwaterloo.ca (autora para correspondencia).

³ Ph.D. Department of Land Resource Science. University of Guelph. Guelph, ON N1G 2W1 Correo electrónico: pvoroney@uoguelph.ca

⁴ Ph.D. GFA Terra Systems, Latin America Division, Eulenkugstrasse 82, 22359 Hamburg, Germany. Correo electrónico: andrea_schlonvoigt@yahoo.de

Lehmann (1995) y Gale *et al.* (2000) sugieren que el aporte del C de las raíces afecta la circulación del C y el N en el suelo. Aunque se ha reconocido la importancia de estudiar las raíces en los sistemas agroforestales (SAF), la cuantificación de su contribución a la biomasa y el C en el suelo ha sido limitada (Huxley 1999, Gray 2000). Por ejemplo, las raíces pueden contribuir de un 30 a un 70% del total de la producción de biomasa en bosques y plantaciones forestales (Fogel 1993), y de un 15 a un 30% en los SAF (Young 1997). Atkinson (1996) sugirió que la asignación debajo de la superficie puede alcanzar hasta 10 a 15 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, pero que la ausencia de información sobre los sistemas radiculares impide el diseño óptimo de SAF.

Los sistemas radiculares de los árboles pueden influir positivamente en los suelos agrícolas y los cultivos, porque interceptan la lixiviación de nutrientes, promueven una mejora física de las capas compactas del suelo y crean macroporos que conducen a una mejor infiltración del agua (Schroth y Lehmann 1995, Schroth *et al.* 1996, Schroth 1996, 1999). Los árboles con raíces profundas pueden alcanzar los recursos que yacen en capas más profundas del suelo, que no están disponibles para los cultivos (Schroth 1999). Las raíces arbóreas estabilizan el suelo, reduciendo también la pérdida de nutrientes por la erosión (Young 1997).

Sin embargo, existen también efectos competitivos entre las raíces de árboles y cultivos. Se han observado rendimientos disminuidos de las cosechas —particularmente cerca de los árboles—, los cuales han sido atribuidos a la competencia por la luz disponible encima de la superficie (van Noordwijk *et al.* 1996, Young 1997) y la competencia por nutrientes y agua debajo de ella (van Noordwijk *et al.* 1995, 1996, Jose *et al.* 2000). Las características de las raíces de los árboles deberían ser uno de los criterios para tomar en cuenta al seleccionar las especies arbóreas para el establecimiento de SAF (Schroth 1995).

Gran parte de la investigación agroforestal relacionada con las raíces comenzó apenas en los años 90 (Schroth 1995, Atkinson 1996, van Noordwijk *et al.* 1996), sin duda debido a las complejidades del *continuum* raíz-suelo. En la actualidad, ningún estudio ha cuantificado la biomasa radicular y la dinámica del C en las raíces, o el potencial que estas tienen para acumular C en el largo plazo, en cultivos en callejones que utilizan árboles de *Erythrina poeppigiana*. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el C radicular y los incrementos anuales de C radicular

en árboles de *E. poeppigiana* de diez y cuatro años en un sistema de cultivo en callejones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

El estudio se llevó a cabo en La Montaña, CATIE, Turrialba, Costa Rica (9°53'N, 88°38'O; 602 msnm). La zona tiene una temperatura promedio anual de 21,7 °C y una precipitación promedio anual de 2648 mm, con 246 días de lluvia al año. Los suelos de La Montaña son isohipertérmicos Eutric Cambisoles, con una textura arcillosa-limosa (25% arena, 34% limo, 41% arcilla) (Kass *et al.* 1995).

El experimento de cultivos en callejones se estableció en 1991, para evaluar la agroeconomía de rotaciones maíz-frijol intercalados con *E. poeppigiana* (clon CATIE 2708, reproducido a partir de estacas) (Chesney 2000). Los árboles originales fueron plantados con un espaciamiento de 6 m entre filas y 2 m dentro de ellas; es decir, con una densidad de 833 árboles ha⁻¹. En 1997, el enfoque de la investigación cambió de solo granos básicos a una rotación de maíz-tomate, donde *E. poeppigiana* proveyó el soporte físico para los tomates. Esto condujo a ajustes del diseño experimental; se redujo el ancho del callejón a 3 m mediante la plantación de estacas adicionales de *E. poeppigiana* entre las ya existentes, lo cual resultó en una densidad total de 1667 árboles ha⁻¹ (833 árboles ha⁻¹, tanto de cuatro como de diez años, en el momento de este estudio).

La poda total de brotes de *E. poeppigiana* comenzó a principios de 1992 y se hizo cada dos años hasta 1995; sin embargo, en 1996 y 1997 los árboles se podaron anualmente. Entre 1995 y 1997, las raíces de los árboles originales se podaron con un arado de disco hasta una profundidad de 25 cm, a una distancia de 50 cm de la fila de los árboles. Entre enero de 1999 y mayo del 2000, se podaron los árboles y las ramas tres veces al año, con dos podas completas y una parcial, utilizando los árboles como estacas vivas para dos cosechas de tomate por año (Chesney 2000). No se aplicaron fertilizantes minerales a partir de 1991 y los rastrojos de las podas se han utilizado como cobertura y abono verde.

Métodos de muestreo de raíces

En mayo de 2001, se muestrearon las raíces gruesas de tres árboles de *E. poeppigiana* de diez y tres de cuatro años de edad (un árbol en cada parcela de tres repeticiones). Para evitar los efectos de borde, se muestrearon destructivamente solo árboles del centro de las parcelas

(parcelas de 24 x 16 m). Las raíces se muestrearon en un área seleccionada al azar alrededor del árbol, que representaba un cuarto del área correspondiente a cada árbol; es decir, un área de muestreo de 1,5 m² (1,5 m hacia el callejón de cultivo y 1,0 m en la hilera de árboles), hasta 60 cm de profundidad. Los resultados fueron multiplicados por cuatro para determinar la biomasa radicular estructural total por árbol, asumiendo una distribución radicular homogénea.



Las raíces de los árboles de *Erythrina poeppigiana* se muestrearon en un área seleccionada al azar alrededor del árbol, representativa de un cuarto del área correspondiente a cada árbol (foto: Maren Oelbermann).

La biomasa arbórea sobre el nivel del suelo se removió primero mediante la separación de los componentes arbóreos en tronco, ramas y hojas. Previo a la excavación de raíces, se cavó una zanja de 0,3 de ancho y 0,7 m de profundidad alrededor del área de 1,5 m² (Böhm 1979). Las capas del suelo a 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad se excavaron por separado y tamizaron con una malla de 5 mm. Se lavaron las raíces para eliminar la tierra y se secaron al sol para remover cualquier exceso de agua acumulado durante el proceso de lavado, y se determinó su peso.

Se secaron las submuestras ($n = 9$; es decir, tres árboles en cada una de las tres parcelas) de 500 g de cada com-

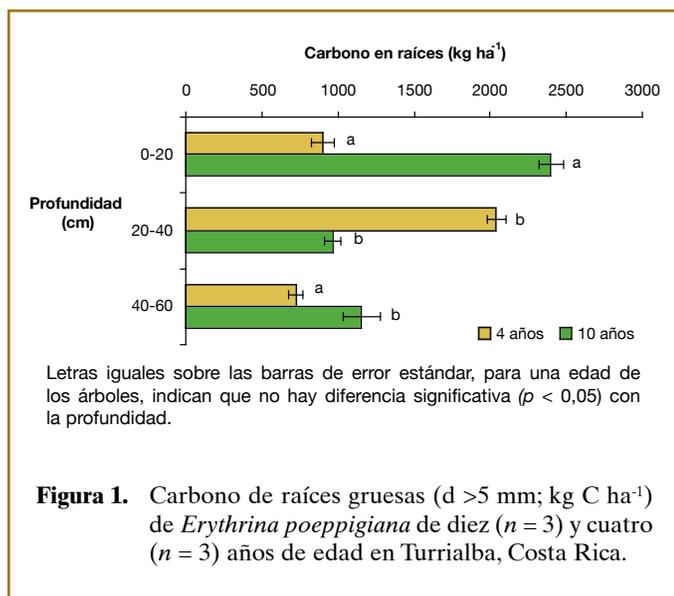
ponente a 70 °C por 48 horas, molidas en un molino Wiley con un tamiz de 1 mm, para evaluar su contenido de C utilizando el método de combustión en seco en una estufa Leco (Leco Corporation 1987). Se calculó el C radicular y el de los componentes aéreos para cada árbol, multiplicando la concentración de C (%) por la cantidad de biomasa encontrada, expresada en kg ha⁻¹, usando una densidad de 833 árboles ha⁻¹ para cada edad (cuatro y diez años). Se estimaron los incrementos anuales de C radicular para cada profundidad, dividiendo el total de C radicular entre la edad respectiva de cada árbol.

Los datos del C de las raíces se examinaron para la homogeneidad de varianzas y normalidad utilizando el SPSS (SPSS Science Inc. 1989). Los datos se analizaron con la prueba de *t* para determinar las diferencias significativas en el C de árboles de cuatro y diez años. Se utilizó un análisis de varianza de un factor para determinar las diferencias con la profundidad. A partir de los análisis de varianza, se analizaron las diferencias significativas utilizando la prueba de comparación múltiple de Tukey (Steel *et al.* 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El C radicular total ($d > 5$ mm) hasta 60 cm de profundidad fue significativamente mayor ($p < 0,05$) para los árboles de diez años (4527 kg C ha⁻¹) que para los de cuatro (3667 kg C ha⁻¹). Para árboles de diez años, la cantidad de C fue significativamente mayor ($p < 0,05$) a 0-20 cm de profundidad que a profundidades de 20-40 y 40-60 cm (Fig. 1). Para árboles más jóvenes, se presentó una cantidad significativamente mayor ($p < 0,05$) de C para 20-40 cm de profundidad, en comparación con profundidades de 0-20 y 40-60 cm. Por lo tanto, los mayores incrementos de C en raíces de árboles de diez años (240 kg C ha⁻¹ año⁻¹) ocurrieron entre los 0 y 20 cm (53% del total de C radicular), mientras que para árboles de cuatro años fueron entre los 20 y 40 cm de profundidad (510 kg C ha⁻¹ año⁻¹; 56% del total de C radicular).

Estudios de otras especies arbóreas en SAF han mostrado que la mayor proporción de sus raíces se encuentra en los 30 cm superiores del suelo. Por ejemplo, Dhyani y Tripathi (2000) determinaron que el 70% de toda la biomasa radicular (incluyendo raíces finas y gruesas) de un sistema de cultivo en callejones en el noreste de la India se encontraba en los 20 cm superiores. Estos autores sugirieron que el desarrollo de las raíces en la superficie ayuda a los árboles a establecerse en suelos pobres en nutrientes, favoreciendo el proceso de circulación y explotación de nutrientes limitados.



Las necesidades de explotación de nutrientes podrían explicar los distintos patrones verticales de las raíces de los árboles de cuatro y diez años de este estudio. La mayor cantidad de C en los 0-20 cm de profundidad en los árboles de diez años podría ser consecuencia de un suelo pobre en nutrientes en el momento del establecimiento del árbol. Además, a lo largo de los primeros seis años, se ha añadido biomasa al suelo con podas arbóreas y residuos de cultivos, lo cual resulta en la acumulación de materia orgánica del suelo y una consecuente mejora en sus propiedades físicas y químicas. Cuando se plantaron los árboles más jóvenes, sus raíces explotaron horizontes más profundos del suelo (20-60), posiblemente debido a las condiciones mejoradas del suelo y/o la competencia con los árboles ya establecidos (de seis años en este momento) y con los cultivos en crecimiento. Schroth (1999) y Dhyaní y Tripathi (2000) notaron que la aplicación de fertilizantes o el uso de podas como *mulch* influyen en la profundidad del enraizamiento. Estos autores sugieren que dichas enmiendas tornan los horizontes superiores del suelo más atractivos para la producción de sistemas radiculares superficiales. Otro factor para tomar en cuenta es que tanto los árboles de cuatro años como los de diez se establecieron a partir de estacas, las cuales tienden a desarrollar sistemas radiculares más superficiales que los árboles derivados de semillas⁵.

En este estudio, la presencia de una capa rocosa a profundidades mayores de 40 cm también pudo haber evitado un enraizamiento más profundo. Rao *et al.* (1993) observaron un patrón similar, en el cual las

profundidades alcanzadas por las raíces de *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* fueron limitadas a profundidades menores por la presencia de una capa rocosa. No obstante, otros estudios han determinado que las mayores biomásas radiculares ocurrieron a mayores profundidades (hasta 60 cm). Por ejemplo, Livesley *et al.* (2000) estudiaron *Grevillea robusta* y *Senna spectabilis* en un SAF de tres años en las tierras altas y subhúmedas de Kenya, donde encontraron una mayor concentración de C radicular en los primeros 60 cm y circunscrito a los 3 m del árbol, de 345 y 390 kg C ha⁻¹, respectivamente. Torquebiau y Kwesiga (1996) determinaron que el C radicular hasta 25 cm de profundidad era de 304 kg C ha⁻¹, comparado con 126 kg C ha⁻¹ entre 25-50 cm, en un SAF con *Sesbania sesban* de dos años, en el este de Zambia. Schroth *et al.* (1996) encontraron que el C radicular hasta 60 cm de profundidad era de 220 y 416 kg C ha⁻¹ para *G. sepium* y *L. leucocephala*, respectivamente. Alegre *et al.* (2000) determinaron que el C de un SAF de *Bactris gasipaes* de 16 años de antigüedad en Perú era de 7490 kg C ha⁻¹ a profundidades de 0-20 cm, y un SAF de estratos múltiples con *B. gasipaes*, *Eugenia stipitata*, *Inga edulis*, *Colubrina glandulosa* y *Coffea arabica* presentó 2630 kg C ha⁻¹ para 0-20 cm (Alegre *et al.* 2000).

Los cambios en la concentración de C en las raíces gruesas en diferentes profundidades no fueron significativamente diferentes ($p < 0,05$) en los árboles de cuatro y diez años. La concentración promedio de C para los árboles de cuatro años fue de 34% ($\pm 1,0$), y de 36% ($\pm 0,8$) para los de diez años. Sommer *et al.* (2000) tampoco encontraron diferencias significativas en la concentración de C respecto a la profundidad, pero reportaron una concentración promedio del 45%. Torquebiau y Kwesiga (1996) determinaron que la concentración de C radicular de *S. sesban* en Zambia era de 35%, muy semejante al resultado del presente estudio.

Los árboles de diez años de edad asignaron un 9% del C total del árbol al sistema radicular (sin tomar en cuenta raíces finas) y los de cuatro años asignaron un 22% (Cuadro 1). Mekonnen *et al.* (1997) encontraron que un 36% del C total de *S. sesban* estaba asignado al sistema radicular. Sin embargo, Nair (1993) reporta que algunos autores han informado acerca de valores de producción del 15% bajo la superficie de bosques tropicales, o de hasta 50% en SAF. Es probable que el porcentaje bajo en el presente estudio haya resultado de las podas drásticas y frecuentes de los árboles.

⁵ Jaysundara. 2002. Department of Land Resource Science, University of Guelph. Reino Unido (comunicación personal).

Cuadro 1. Distribución de carbono entre los componentes aéreos y subterráneos de árboles de *Erythrina poeppigiana*, de diez y cuatro años de edad, en Turrialba, Costa Rica

Componentes	Edad de los árboles	
	10 años	4 años
Hojas ⁽²⁾ (kg C ha ⁻¹ año ⁻¹)	2653	2001
Ramas ⁽²⁾ (kg C ha ⁻¹ año ⁻¹)	1650	1068
Tallo ⁽³⁾ (kg C ha ⁻¹ año ⁻¹)	434	253
Raíces ⁽³⁾ (kg C ha ⁻¹ año ⁻¹)	453	917
C asignado a raíces (% del total en el árbol)	9	22

⁽²⁾ Totales para tres podas en un año ($n = 9$).

⁽³⁾ $n = 3$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los árboles de mayor edad de *E. poeppigiana* tuvieron más C en la biomasa radicular que los más jóvenes. El mayor incremento anual ocurrió entre 0 y 20 cm para los árboles de diez años, y a los 20-40 cm para los de cuatro años. Esta diferencia podría deberse a niveles menores de nutrientes y materia orgánica en el suelo en el momento del establecimiento del experimento agroforestal, factores que motivaron la asignación inicial de la mayor parte del C a las raíces en los niveles superiores del horizonte del suelo. También podría ser resultado de competencia radicular que afectó los árboles establecidos posteriormente.
- El C total de las raíces y el contenido de C en la materia orgánica de los mismos (%) fueron similares a los de estudios previos que utilizaron especies forestales multipropósito en diversas regiones geográficas. La asignación de C al sistema radicular (9 y 22% del total en los árboles) en este estudio fue baja comparada con estudios anteriores en SAF, probablemente debido a las podas fuertes y frecuentes. Además, la diferencia entre los resultados publicados y los reportados aquí puede estar en función de la productividad del sitio y los métodos de muestreo.
- Se recomienda llevar a cabo más estudios que utilicen árboles agroforestales multipropósito para cuantificar la biomasa radicular y el almacenamiento de nutrientes en ellos, para lograr una mejor comprensión de la captura de nutrientes y secuestro de C bajo la superficie en el largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Natural Sciences and Engineering Research Council de Canadá (NSERC) y al Instituto Interamericano de Cooperación para

la Agricultura (IICA-Canadá) el apoyo financiero brindado para esta investigación. Asimismo, agradecen a Francisco Núñez, Joaquín Soto y Marvin Saborío por su asistencia en el campo, y a Alexis Pérez por su apoyo técnico.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alegre, J; Arévalo, L; Ricse, A. 2000. Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía Peruana. ICRAF-Perú. AgroFor2-L. 9 p.
- Atkinson, D. 1996. Why study roots? Agroforestry Forum 7: 2-4.
- Balesdent, J; Balabane, M. 1996. Major contributions of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. Soil Biology and Biochemistry 28: 1261-1263.
- Böhm, W. 1979. Methods of Studying Root Systems. Berlín, Springer Verlag. 188 p.
- Chesney, PEK. 2000. Pruning effects on roots of nitrogen fixing trees in the humid tropics. Ph.D. Thesis. Turrialba, CR, CATIE. 222 p.
- Dhyani, SK; Tripathi, RS. 2000. Biomass and production of fine and coarse roots of trees under agrosilvicultural practices in north-east India. Agroforestry Systems 50: 107-121.
- Fogel, R. 1983. Root turnover and productivity in coniferous forests. Plant and Soil 71: 75-86.
- Gale, WJ; Cambardella, CA; Bailey, TB. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. Soil Science Society of America Journal 64: 20-207.
- Gray, GRA. 2000. Root distribution of hybrid poplar in a temperate agroforestry intercropping system. M.Sc. Thesis. Department of Environmental Biology, University of Guelph. 114 p.
- Huxley, P. 1999. Tropical Agroforestry. Oxford, UK, Blackwell Science. 371 p.
- Jose, S; Gillespie, AR; Seifert, AR; Mengel, DB; Pope, PE. 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the Midwestern USA: 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. Agroforestry Systems 48: 61-79.
- Kass, DCL; Jiménez, M; Kaufnam, HH; Heredia, C. 1995. Reference Soils of the Turrialba Valley and Slopes of the Irazú Volcano. Soil Brief Costa Rica No. 2. Turrialba, CR, CATIE - International Soil Reference Center. 26 p.
- Leco Corporation. 1987. Instruction manual for the CR-12 Carbon System 781-600. St. Joseph, MI, US, Leco. 129 p.
- Livesley, SJ; Gregory, PJ; Buresh, RJ. 2000. Competition in tree row agroforestry systems. 1. Distribution and dynamics of fine root length and biomass. Plant and Soil 227: 149-161.
- Mekonnen, K; Buresh, KJ; Jama, B. 1997. Root and inorganic nitrogen distributions in *Sesbania* fallow, natural fallow and maize fields. Plant and Soil 188: 319-327.
- Nair, PKR. 1993. An introduction of Agroforestry. Dordrecht, NL, Kluwer Academic Publishers. 499 p.
- Rao, MR; Muraya, P; Huxley, PA. 1993. Observations of some tree root systems in agroforestry intercrop situations, and their graphical representation. Experimental Agriculture 29: 183-194.
- Schroth, G. 1995. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. Agroforestry Systems 30: 125-143.
- _____. 1996. Current needs in root research for agroforestry. Agroforestry Forum 7: 10-11.

- _____. 1999. A review of belowground interactions in agroforestry, focusing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems* 42: 5-24.
- _____; Lehmann, J. 1995. Contrasting effects of roots and mulch from three agroforestry tree species on yield of alley cropped maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 54: 89-101.
- _____; Kolbe, D; Pity, B; Zech, W. 1996. Root system characteristics with agroforestry relevance of nine leguminous tree species and a spontaneous fallow in a semi-deciduous rainforest area of West Africa. *Forest Ecology and Management* 84: 199-208.
- Sommer, R; Denich, M; Vlek, PLG. 2000. Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region, Brazil. *Plant and Soil* 219: 231-341.
- SPSS Science Inc. 1989. *SPSS for Windows User's Guide*, Version 10.0. Chicago, IL, US, SPSS Science. 354 p.
- Steel, GD; Torrie, JH; Dickey, DA. 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York, NY, US, McGraw-Hill. 633 p.
- Torquebiau, EF; Kwesiga, F. 1996. Root development in a *Sesbania sesban* fallow-maize system in Eastern Zambia. *Agroforestry Systems* 34: 193-211.
- Van Noordwijk, M; Spek, LY; Purnomisidhi, P. 1995. Quantifying shallow roots. *Agroforestry Today* 6: 9-11.
- _____; Lawson, M; Soumare, G; Groot, JHR; Hairiah, K. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. *In* Ong, CK; Huxley, PA. eds. *Tree-Crop Interactions: a Physiological Approach*. Wallingford, UK, CAB International. 421 p.
- Yamoah, CF; Agboola, AA; Wilson, GF; Mulongou, K. 1986. Soil properties as affected by the use of leguminous shrubs for alley cropping with maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 18: 167-177.
- Young, A. 1997. *Agroforestry for Soil Management*. Wallingford, UK, CAB International. 214 p.

Artículos invitados

Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica¹

Sergio de Miguel Magaña²; Jean Michel Harmand³; Kristell Hergoualc'h⁴

Palabras claves: almacenamiento de carbono; *Eucalyptus deglupta*; *Erythrina poeppigiana*; hojarasca; *Terminalia ivorensis*.

RESUMEN

Se cuantificó el carbono almacenado en la fitomasa aérea (biomasa viva y mantillo) de diferentes sistemas agroforestales de café en la zona Pacífico Sur de Costa Rica. Se desarrollaron relaciones alométricas para estimar la biomasa de dos especies maderables y muestreos aleatorios para evaluar la biomasa de café, mantillo y una especie arbórea de servicio. En comparación con un sistema de *Coffea arabica* en monocultivo a pleno sol de 14 años, un sistema de *C. arabica* (14 años) sombreado por *Eucalyptus deglupta* (siete años) aumentó el almacenamiento de C en la fitomasa por encima del suelo en 17 t ha⁻¹. Este valor correspondió a la biomasa aérea de los árboles (14 tC ha⁻¹) y al incremento de la capa de mantillo desde 1,2 tC ha⁻¹ bajo café a pleno sol hasta 4,2 tC ha⁻¹ bajo *E. deglupta*. Además, en una comparación de sistemas agroforestales de café de cuatro años, la especie forestal que más C almacenó en su biomasa aérea fue *Terminalia ivorensis* (12,4 tC ha⁻¹), seguida por *E. deglupta* (5,3 tC ha⁻¹) y *Erythrina poeppigiana* (4,4 tC ha⁻¹).

Quantification of carbon stored in aboveground biomass and the litter layer in agroforestry systems with coffee in the South-West of Costa Rica

Key words: Carbon storage; *Erythrina poeppigiana*; *Eucalyptus deglupta*; fallen leaves; *Terminalia ivorensis*.

ABSTRACT

Carbon stored in aboveground phytomass (live biomass and litter layer) was quantified in different agroforestry systems with coffee in the Southern Pacific zone of Costa Rica. Allometric relationships were developed to estimate timber tree biomass (two species). Random sampling was used to evaluate the biomass in one "service" tree species, coffee and the litter layer. Comparing 14 year old *Coffea arabica* plantations (monocultures and shaded plots), inclusion of *Eucalyptus deglupta* (seven years old) increased the C stock in the above ground phytomass by 17 t ha⁻¹. This value included the amount of C stored in the above ground tree biomass (14 tC ha⁻¹) and the increase in the litter layer from 1.2 tC ha⁻¹ under full sun coffee to 4.2 tC ha⁻¹ under *E. deglupta*. When different tree-coffee systems (four years old) were compared *Terminalia ivorensis* stored the largest amount of C in the aboveground biomass (12.4 tC ha⁻¹), followed by *E. deglupta* (5.3 tC ha⁻¹) and *Erythrina poeppigiana* (4.4 tC ha⁻¹).

INTRODUCCIÓN

Existe un gran interés en conocer el potencial de almacenamiento de carbono (C) en los sistemas agroforestales (SAF), ya que estos podrían ser tomados en cuenta por los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) del Protocolo de Kioto (UNFCCC 2002). En Costa Rica, los SAF ya han sido reconocidos por el

Decreto No. 30962 (MINAE 2003) en virtud de los servicios ambientales que brindan a la sociedad, entre los cuales se encuentra el secuestro de C.

La cantidad de C almacenado en los árboles de sombra está directamente relacionada con la biomasa en

¹ Basado en: De Miguel Magaña, S. 2002. Dynamique de la biomasse de différents systèmes agroforestiers caféiers dans la zone Sud du Costa Rica. Tesis M. Sc. ENGREF, Francia.

² M.Sc. en Forestería Rural y Tropical, ENGREF, Francia. Correo electrónico: sergio.demiguel@ctfc.es (autor para correspondencia).

³ Profesor-investigador, CATIE/CIRAD Correo electrónico: jean_michel.harmand@cirad.fr

⁴ Investigadora, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: hergoualc'h@catie.ac.cr

pie. Desde un punto de vista económico, también es importante conocer el potencial de producción de madera de los SAF para la diversificación de las fuentes de ingreso de la finca. Este estudio se enfocó en la cuantificación del C almacenado en la fitomasa aérea (biomasa y mantillo) de diferentes SAF de café. En primer lugar, se comparó un sistema de café a pleno sol con un sistema sombreado por *Eucalyptus deglupta*. Posteriormente, se evaluó cuánto C almacenaban tres especies de árboles de sombra usadas en sistemas de café en la Zona Sur de Costa Rica: dos maderables (*Terminalia ivorensis* y *E. deglupta*) y una leguminosa (*Erythrina poeppigiana*). Finalmente, utilizando el método de cálculo de los MDL (Smith y Scherr 2002), se estimó la adicionalidad de un proyecto de café sombreado por *E. deglupta*, con una línea base de café a pleno sol.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica cerca de la costa Pacífico Sur de Costa Rica, 20 km al sur de la ciudad de San Isidro del General, en las fincas Verde Vigor y Santa Fe (9°15'-9°16'N, 83°29'-83°30'O; entre 600 y 700 msnm). La humedad relativa promedio del aire (87,5 %) y la temperatura promedio anual (25,7 °C) son elevadas. La precipitación anual es de 3516 mm en Verde Vigor y 2740 mm en Santa Fe, con una estación seca de tres meses (entre enero y marzo). Según la clasificación de Holdridge, la zona de vida del sitio corresponde a un

Bosque Húmedo Tropical. Los suelos fueron clasificados como Ustox Palehumult. El uso anterior de los suelos para potreros o caña provocó un efecto muy negativo sobre la fertilidad de los mismos (características físicas y químicas). No obstante, los altos aportes de fertilizantes al café compensaron esta baja fertilidad.

En la finca Santa Fe, se escogieron dos plantaciones comerciales adyacentes, de 0,5 ha cada una (Cuadro 1; café a pleno sol y café con eucalipto), en las cuales el café fue establecido en 1988 y los eucaliptos en 1995. Las dos plantaciones tuvieron la misma historia y manejo. Dado que no había otro par de parcelas con las mismas condiciones, no fue posible obtener repeticiones.

En la finca Verde Vigor se trabajó en un ensayo con bloques completos al azar, originalmente con cuatro réplicas. Los tratamientos principales fueron las asociaciones de *C. arabica* con árboles maderables (*E. deglupta* o *T. ivorensis*) o con árboles de servicio (leguminosa *E. poeppigiana*). La plantación de *C. arabica* cv. Costa Rica 95 fue establecida en mayo de 1998. En julio de 1998 se establecieron los árboles *E. deglupta* o *T. ivorensis* a 6 x 6 m, y *E. poeppigiana* a 8 x 8 m. Las mediciones de fitomasa se realizaron en tres parcelas con maderables y dos parcelas con el árbol de servicio, las cuales recibieron el mismo manejo y tenían la misma pendiente.

Cuadro 1. Características de las parcelas agroforestales con café estudiadas en la Zona Sur de Costa Rica

Sistema	Uso anterior del suelo	Parcelas estudiadas (no.)	Tamaño de parcelas (m x m)	Edad (años)		Densidad (unidad ha ⁻¹)	
				Árboles	Cafetos	Árboles	Cafetos
Finca Santa Fe							
<i>Coffea arabica</i> a pleno sol	Potrero	1	70 x 70	—	14	—	5819
<i>C. arabica</i> – <i>Eucalyptus deglupta</i>	Potrero	1	70 x 70	7	14	120	6035
Finca Verde Vigor							
<i>C. arabica</i> – <i>Terminalia ivorensis</i>	Caña	3	48 x 42	4	4	250	4720
<i>C. arabica</i> – <i>E. deglupta</i>	Caña	3	48 x 42	4	4	250	4720
<i>C. arabica</i> – <i>Erythrina poeppigiana</i>	Caña	2	48 x 40	4	4	156	4720

Medición de la fitomasa por encima del suelo

Se utilizó un valor promedio de 0,5 para la fracción de C contenida en la materia seca (MS) (Hamburg 2000). En el caso de los árboles de sombra maderables, se establecieron relaciones alométricas entre el dap (diámetro del tallo a la altura del pecho) y la biomasa aérea de cada árbol. Primero se midieron los dap de todos los árboles, y para cada sistema se eligieron entre 10 y 12 árboles que representaban todas las clases diamétricas en forma proporcional a su frecuencia en el inventario de este sistema. Se talaron estos individuos entre mayo y junio, cuando la biomasa foliar no estaba todavía en su máximo, se midió su longitud y se pesaron por partes (tronco; ramas con diámetro >3 cm; ramas con diámetro de 1-3 cm; ramas con diámetro <1 cm; hojas). Se secaron fracciones representativas de cada parte de cada árbol en un horno a 65 °C hasta peso constante, para calcular los grados de humedad y, así, la MS contenida en cada árbol. Las relaciones alométricas obtenidas (Cuadro 2) se aplicaron al inventario de las parcelas para obtener la biomasa aérea arbórea en MS de las parcelas. Esta biomasa dividida entre la superficie permitió calcular la biomasa aérea arbórea por unidad de superficie.



Medición del peso de muestras de tronco para secarlas posteriormente y calcular su contenido de humedad, finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica (foto: Sergio de Miguel Magaña).

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para la determinación de la biomasa de los árboles de sombra en cafetales de la Zona Sur de Costa Rica

Especie maderable	Ecuación para la parte aérea del árbol	P > F	R ²
<i>Eucalyptus deglupta</i> en Santa Fe	Ln MS = -2,31 + 2,4746 Ln (dap) (rango dap 11-32)	<0,0001	0,99
<i>E. deglupta</i> en Verde Vigor	Ln MS = -2,76342 + 2,60778 Ln (dap) (rango dap 6-22)	<0,0001	0,98
<i>Terminalia ivorensis</i> en Verde Vigor	Ln MS = -2,28454 + 2,40818 Ln (dap) (rango dap 9-23)	<0,0001	0,94

MS=materia seca (kg árbol⁻¹); dap =diámetro del tallo a la altura del pecho (cm); Ln=logaritmo natural.

El manejo local de *E. poeppigiana* —poda drástica dos veces al año— no permitió establecer una relación entre el dap y la biomasa aérea del árbol. Por lo tanto, primero se estimó el volumen del tronco y se pesaron las ramas y hojas (residuos de una poda total) de 12 árboles seleccionados al azar entre las dos parcelas (seis por parcela). Para calcular el volumen del tallo de *E. poeppigiana*, se midió la altura y los diferentes diámetros del tronco (a 10 y 130 cm del suelo y en el punto de intersección con las ramas). El volumen promedio del tronco multiplicado por la densidad de la madera —250 kg MS m⁻³ según Ávila (2000)— permitió estimar su biomasa. Se separaron y pesaron por árbol ramas jóvenes (menos de un año), ramas viejas (más de un año) y hojas. Se evaluó el grado de humedad y la MS de ramas y hojas (una muestra por árbol de ramas jóvenes, ramas viejas y hojas). La biomasa por unidad de superficie se obtuvo sumando la MS contenida en el tronco, las ramas y las hojas, y multiplicando el promedio de biomasa por árbol de los 12 árboles por la densidad de la plantación (156 árboles ha⁻¹).

En cuanto a los cafetos, en las plantaciones de cuatro años de Verde Vigor se midió solamente la biomasa aérea del café en el sistema con eucalipto en el mes de junio. Para ello, se midió el número de tallos por planta, así como la altura y diámetro de los tallos a 10 cm del suelo de 12 cafetos por sistema seleccionados aleatoriamente, y se pesó seguidamente cada parte (tallos, bandolas, hojas y frutos). Se estableció el grado de humedad para cada parte con tres muestras por parcela. La biomasa aérea de los cafetos se obtuvo multiplicando la MS promedio de los cafetos por la densidad de plantación (4720 cafetos ha⁻¹).



Separación de las diferentes partes de un café (hojas, fruto, bandolas y tallo) para calcular la biomasa, Finca verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica (foto: Sergio de Miguel Magaña).

En Santa Fe, los cafetos tenían 14 años, por lo cual ya se encontraban bajo el ritmo de manejo practicado en la región, que tiene como objetivo renovar la parte vegetativa de la planta en beneficio de los órganos fructíferos. Este manejo consiste en una poda a 20 cm del suelo, realizada a partir del cuarto año de instalación del café, y conlleva la eliminación de casi toda la parte aérea de este. Se aplica agrupando tres hileras de plantación de cafetos, de tal manera que se poda anualmente una hilera diferente para volver sobre la misma al cabo de tres años. Por este motivo, se efectuó un inventario previo de las alturas de los cafetos, con el fin de determinar la planta de tamaño promedio para cada tipo de hilera. Luego, se seleccionaron de 7 a 10 plantas de alturas promedio por tipo de hilera, para las mediciones de biomasa (totales de 21 cafetos del sistema con *E. deglupta* y 28 en pleno sol).

La medición de la biomasa del mantillo fue realizada sobre todas las parcelas, con excepción de aquellas sombreadas por *E. poeppigiana*, donde el mantillo no era representativo de los sistemas café-*E. poeppigiana* de la región debido a un régimen de poda demasiado intensivo, pero con una densidad de plantación por debajo de lo común: 8 x 8 en lugar de 4 x 6 m. En cada parcela se extrajeron ocho muestras de 0,5 m², secadas hasta peso constante, tomadas con dos marcos de 0,25 m² ordenados a ras del suelo, siguiendo un muestreo sistemático aleatorio (Fig. 1). La contaminación por suelo provoca una sobreestimación del peso; por lo tanto, se calcinaron seis submuestras compuestas de cada sistema a 550 °C y el peso de cenizas que representa el material mineral inerte fue deducido del peso inicial de la muestra.

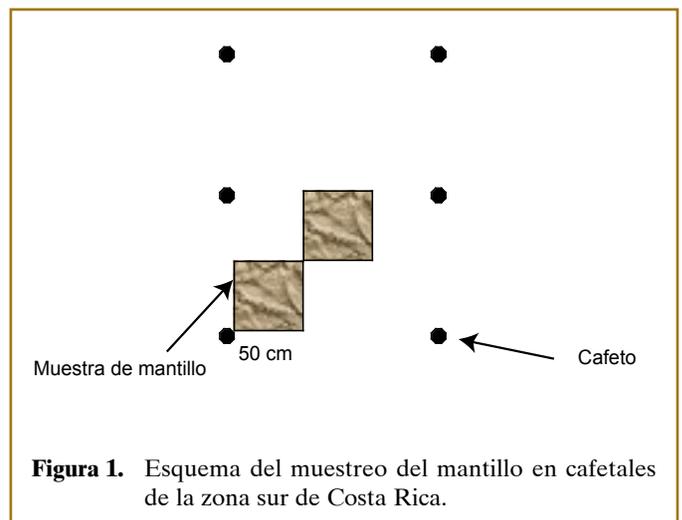


Figura 1. Esquema del muestreo del mantillo en cafetales de la zona sur de Costa Rica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de dos sistemas de café: *C. arabica* a pleno sol y *C. arabica* bajo sombra de *E. deglupta*

La presencia de *E. deglupta*, plantado a una densidad de 120 árboles ha⁻¹, no influyó en la producción de biomasa ni, por lo tanto, en la fijación de C en los cafetos de 14 años en la finca Santa Fe (Cuadro 3). Fassbender (1993) aseveró que existe una considerable diferencia de crecimiento del café entre sistemas de café sombreados y sistemas a pleno sol, siempre y cuando factores tales como la fertilización y el agua no sean limitantes. Sin embargo, cabe subrayar que la introducción de los árboles en Santa Fe se hizo cuando los cafetos estaban ya bien establecidos, por lo cual no sufrieron por competencia con los árboles hasta después de los siete años.

Cuadro 3. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de dos sistemas de café (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica

Sistema	Carbono almacenado (tC ha ⁻¹)			
	Árboles	Cafetos	Mantillo	Total
<i>C. arabica</i> a pleno sol	—	10,2 (±1,5)	1,2 (±0,3)	11,4
<i>C. arabica</i> – <i>Eucalyptus deglupta</i>	14,0 (±0,6)	10,2 (±1,1)	4,2 (±0,8)	28,4

Entre paréntesis: intervalo de confianza al 95%.

Aun así, se observó una gran diferencia en el almacenamiento de C arriba del suelo entre los dos sistemas (más del doble para el sistema *C. arabica*-*E. deglupta*), debido a la contribución de los árboles y a la mayor acumulación de mantillo bajo los mismos (Cuadro 3). La menor cantidad de mantillo acumulada en la parcela a pleno sol ($p = 0,003$) pudo deberse a una menor cantidad de hojarasca (solo de café) y/o a una descomposición más rápida de esta como consecuencia del aumento de temperatura de la superficie del suelo a pleno sol, combinada con un alto grado de humedad en este clima lluvioso.

El C almacenado arriba del suelo (biomasa y mantillo) en el sistema de café a pleno sol (Cuadro 3) es semejante al valor de 10,4 tC ha⁻¹ encontrado por Ávila *et al.* (2001) para sistemas no sombreados, con cafetos de 9-10 años, plantados a una densidad de 4170 cafetos ha⁻¹ en el Valle Central de Costa Rica (1300 msnm, temperatura de 23,8 °C, precipitación de 2275 mm). También coincide con los resultados encontrados por Palm *et al.* (2000) de 15 tC ha⁻¹ para un monocultivo de ocho años en Brasil (Rondônia).

Las reservas de C en la parte aérea y el mantillo del sistema de café con eucalipto de siete años son similares a las estimaciones hechas por Powell y Delaney (1998) (10,5 y 4,5 tC ha⁻¹ en la parte aérea y la hojarasca, respectivamente) para sistemas de café sombreado por *Inga* spp., *Grevillea robusta* o *Alnus* spp. en Guatemala (densidades respectivas de 4444 plantas ha⁻¹ y 200 árboles ha⁻¹; 1540 msnm, temperatura de 18-24 °C, precipitación de 1500-2000 mm). Asimismo, nuestra estimación de C almacenado arriba del suelo (28,4 tC ha⁻¹) se encuentra dentro de las estimaciones hechas por Schroeder (1994) de 21 a 50 tC ha⁻¹ para SAF en ecozonas subhúmedas y húmedas.

Comparación del carbono almacenado por sistemas agroforestales de café bajo sombra de diferentes especies de la misma edad

La mayor cantidad de C almacenada en los árboles de sombra se encontró en la especie *T. ivorensis*, seguida por *E. deglupta* y *E. poeppigiana* (Cuadro 4). No hubo diferencia entre las capas de mantillo, las cuales solamente son comparables entre los sistemas con *T. ivorensis* y *E. deglupta*, porque el manejo de *E. poeppigiana* era muy diferente y no era representativo de las prácticas agrícolas de la región.

Cuadro 4. Carbono almacenado en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de café bajo sombra de diferentes especies, de cuatro años de edad, en la finca Verde Vigor, Zona Sur de Costa Rica

Sistema	Carbono almacenado (tC ha ⁻¹)			
	Árboles	Cafetos	Mantillo	Total
<i>Coffea arabica</i> – <i>Terminalia ivorensis</i>	12,4b (± 0,3)	No medido	1,2a (±0,1)	—
<i>C. arabica</i> – <i>Eucalyptus deglupta</i>	5,3a (± 0,3)	5,0 (± 0,4)	1,4a (±0,1)	11,75
<i>C. arabica</i> – <i>Erythrina poeppigiana</i>	4,7a (± 0,5)	No medido	No medido	—

Entre paréntesis: intervalo de confianza al 95%.

El alto almacenamiento de C en la biomasa aérea de *T. ivorensis* atestigua el vigor de esta especie. Sin embargo, este árbol produce una sombra excesiva, con impactos negativos sobre la producción de café. Por ejemplo, Aguilar (2000) observó que los cafetos bajo sombra de *T. ivorensis* no parecían muy vigorosos y presentaban poca capacidad de producción de frutos. El C almacenado por *T. ivorensis* en su biomasa aérea (cuatro años de edad) es semejante al valor de 14,6 t ha⁻¹ que obtuvieron Alpizar *et al.* (1985) para *Cordia alliodora* (4,5 años) en sistemas de café (multiplicando la MS por 0,5; densidad de 278 árboles ha⁻¹; 600 msnm; temperatura de 22,3 °C; precipitación de 2647 mm año⁻¹).

El sistema de café con *E. deglupta* tiene un almacenamiento de C muy semejante al calculado a partir de los datos de Ávila (2000), de 5,8 tC ha⁻¹ para los árboles y 4,7 tC ha⁻¹ para los cafetos (café de 9 a 10 años sombreado por *E. deglupta* de cuatro años; densidades de 4166 cafetos ha⁻¹; 277 árboles ha⁻¹). El C acumulado en las hojas y ramas de *E. poeppigiana* (3,7 t ha⁻¹) también se aproxima a una estimación de

3 tC ha⁻¹, derivada del trabajo de Ávila (2000) para *E. poeppigiana* en café en Grecia, Costa Rica (dos podas al año; 4166 cafetos ha⁻¹; 156 árboles ha⁻¹).

Cálculo de adicionalidad según la metodología de los mecanismos de desarrollo limpio

Los SAF están considerados en proyectos de reforestación por los MDL del Protocolo de Kioto (artículo 12, Decisión 17 cap. 7 (a)) (UNFCCC 2002). Los SAF deben caber en la definición de bosques; es decir, la transformación de café a pleno sol en café con sombra debe ser considerada como reforestación.

Además de tener que ser de forestación-reforestación, los proyectos de MDL deben demostrar “adicionalidad”; es decir, que las reducciones logradas por el proyecto no hubieran ocurrido en ausencia de este (Cacho *et al.* 2003). Los créditos de C se obtienen por diferencia de las emisiones por las actividades del proyecto y sin el proyecto o línea base (Smith y Scherr 2002). En este estudio, si se asume una línea base de café a pleno sol, la diferencia entre el C almacenado en el sistema sombreado y la línea base es un buen indicador de la adicionalidad en un año determinado para este sistema específico (con sus respectivas especies, edades, densidades, localización geográfica y uso anterior del suelo, entre otros).

Para Santa Fe, esta adicionalidad sería entonces de 28,4-11,4 = 17 tC ha⁻¹, dato inferior a las estimaciones hechas en el proyecto piloto de MDL SCOEL TÉ, de 24 tC ha⁻¹ a los siete años en un sistema de café sombreado por *Cedrela odorata* y *Swietenia macrophylla* (caoba) en México. Este resultado de 17 tC ha⁻¹ se obtuvo haciendo la simulación con CO2Fix (Maser *et al.* 2001, Nabuurs *et al.* 2001), con los parámetros especificados por el proyecto. El proyecto SCOEL TÉ, como la mayoría de los proyectos pilotos de MDL, presupone que el uso del suelo no va a cambiar, por lo cual el almacenamiento promedio de C del suelo en el largo plazo sería el mismo que en la línea base. A pesar de esta estimación, y tal como lo estipula la metodología del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2003) para los inventarios de carbono en proyectos de cambio de uso de la tierra, sí tiene que medirse la cantidad de C almacenada en el suelo de la línea base. No obstante, cuando se habla del servicio ambiental de almacenamiento de C, no hay que olvidar los conceptos de flujos en el secuestro de C (lo que implica una variación de la adicionalidad a lo largo del proyecto) y de permanencia; es decir, cuánto tiempo va a permanecer el C almacenado. Por ello, para un

proyecto MDL, es necesario planificar cuándo se van a aprovechar los árboles de sombra para usarlos como madera y calcular la adicionalidad acumulada durante dicho período.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los SAF de café, en comparación con los sistemas a pleno sol, brindan un servicio ambiental de almacenamiento de C que es variable según la edad del sistema y las especies de sombra.
- Un sistema agroforestal de café con árboles de *E. deglupta* de siete años puede almacenar más del doble de C que un cafetal comparable a pleno sol.
- *T. ivorensis* almacena más del doble de C que *E. deglupta* y *E. poeppigiana*, a una edad de cuatro años. No obstante, esta medición representa el C almacenado a una edad determinada; es posible que a una edad mayor la especie que almacene más C sea otra.
- El almacenamiento de C es un servicio ambiental sostenible cuando se mantiene durante un tiempo suficiente y se acumula durante ese período suficiente C para compensar emisiones provenientes de otras fuentes. El método de valorización del secuestro de C en los SAF podría ser similar al aplicado en los MDL, estimando la adicionalidad del proyecto (diferencia entre las emisiones con las actividades del proyecto y sin el proyecto) acumulada durante los años de permanencia que se requieran.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CASCA (Sistemas Agroforestales de Café en América Central), financiado por la Comisión Europea, Programa del Quinto Esquema de la Comunidad Europea, “Confirming the International Role of Community Research”, INCO-DEV: ICA-CT-2001-10071.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aguilar, CA. 2000. Evaluación de sistemas agroforestales con café asociado con *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* e implicaciones metodológicas. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 73 p.
- Alpizar, L; Fassbender, HW; Heuvelop, J; Enríquez, GA; Folster, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba 35:233-242.
- Ávila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno Sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno Sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 99 p.

- _____; Jiménez, F; Beer, J; Ibrahim, M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35.
- Cacho, OJ; Marshal, GR; Jilne, M. 2003. Smallholder agroforestry projects: Potential for carbon sequestration and poverty alleviation. FAO. (ESA Working Paper no. 03-06).
- Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Segunda edición. Turrialba, CR, CATIE/GTZ. 491 p. (Serie de Materiales de Enseñanza no. 29).
- Hamburg, SP. 2000. Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 5:25-37.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Japón, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 595 p.
- Masera, O; Garza-Caligaris, JF; Kanninen, M; Karjalainen, T; Nabuurs, GJ; Pussinen, A; de Jong, BJ. 2001. Modeling Carbon sequestration in Afforestation and Forest Management Projects: The CO2fix V.2 Approach. *En preparación*.
- MINAE (Ministerio del Ambiente y Energía). 2003. Decreto ejecutivo n°30962. La Gaceta, San José, CR, feb. 3.
- Nabuurs, GJ; Garza-Caligaris, JF; Kanninen, M; Karjalainen, T; Lapvetelainen, T; Liski, J; Masera, O; Mohren, GMJ; Pussinen, A; Schelhaas, MJ. 2001. CO2FIX V2.0 – manual of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. *ALTERRA Report*. Wageningen, NE.
- Palm, CA; Woomer, PL; Alegre, J; Arevalo L; Castilla, C; Cordeiro, DG; Feigl, B; Hairiah, K; Kotto-Same, J; Mendes, A; Moukam, A; Murdiyarso, D; Njomgang, R; Parton, WJ; Ricse, A; Rodrigues, V; Sitompul, SM; van Noordwijk, M. 2000. Carbon sequestration and trace gas emissions in slash-and-burn and alternative land-uses in the humid tropics. ASB Climate change working group, final report, phase II (en línea). Nairobi, KE. Disponible en <http://www.asb.cgiar.org/WG-climatechange.shtm>
- Powell, HP; Delaney, M. 1998. Carbon sequestration and sustainable coffee in Guatemala. Final report by Winrock International to TechnoServe (en línea). Consultado 10 jul. 1998. Disponible en <http://www.winrock.org/REEP/carbonReport.html>
- Proyecto SCOLEL TÉ, 2002. Disponible en http://www.eccm.uk.com/scolelte/documents/tropical_coffee_timber.pdf
- Schroeder P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89-97.
- Smith J, Scherr, SJ. 2002. Forest Carbon and local livelihoods: assessment of opportunities and policy recommendations (en línea). CIFOR occasional paper n°37. 56 p. Disponible en http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-037.pdf
- UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático). 2002. Protocolo de Kioto (en línea). Disponible en <http://unfccc.int/cdm/rules/modproced.html#FPART>

Artículos invitados

Tipologías cafetaleras de la Reserva Natural Miraflores - Moropotente, Estelí, Nicaragua¹

Cristhian Zúñiga²; Eduardo Somarriba³; Vera Sánchez⁴

Palabras claves: *Coffea arabica*; conservación de biodiversidad; sistemas multiestrato; sombra.

RESUMEN

Se identificaron cinco tipos de fincas cafetaleras en la Reserva Natural Miraflores-Moropotente en Estelí, Nicaragua, las cuales forman un gradiente entre cafetales más diversos, bajo dosel de bosque raleado, y cafetales poco diversos, con alta densidad de musáceas y baja riqueza de especies. Las tipologías ayudan a conciliar los intereses de conservación de biodiversidad y de producción cafetalera en la Reserva, mediante la manipulación cuidadosa de la abundancia, composición florística y estructuración vertical de los doseles de sombra según el tipo de cafetal. Estos cafetales ofrecen el mayor potencial de conservación de biodiversidad de todos los agroecosistemas de la Reserva.

Coffee typologies in the Miraflores – Moropotente Nature Reserve, Estelí, Nicaragua

Key words: Biodiversity conservation; *Coffea arabica*; multistrata systems; shade.

ABSTRACT

Five types of coffee farms were identified in the Nature Reserve Miraflores-Moropotente in Estelí, Nicaragua. These form a gradient from the most diverse, under thinned forest canopies, to least diverse, which have a high density of Musaceae and low species richness. These typologies help conciliate the interests of biodiversity conservation and coffee production in the Reserve, through the careful manipulation of the abundance, floristic composition and vertical structure of the shade canopies, according to the type of plantation. These coffee plantations offer the highest potential for biodiversity conservation of all the agrosystems in the Reserve.

INTRODUCCIÓN

Las tipologías son una herramienta metodológica que facilita la conceptualización de los sistemas de producción, el diseño de recomendaciones tecnológicas (dominios de recomendación) y la modelación. Las tipologías cafetaleras se han basado en el nivel tecnológico de la producción cafetalera (Mejía 1990, Méndez y Benoit-Catin 1994) o en los rasgos fisonómicos de la vegetación del cafetal que influyen en su potencial para conservar biodiversidad (Somarriba *et al.* 2004). A pesar de su importancia para la regulación de la entrada de radiación solar; la modificación de otros aspectos del microclima del cafetal que afectan el desarrollo y producción de los

cafetos; la incidencia de los patógenos que lo atacan; la diversificación productiva, y el manejo del riesgo financiero de la unidad de producción (Beer *et al.* 1998), ningún esfuerzo tipológico ha tomado en cuenta las funciones del dosel de sombra.

En este estudio, se identifican y analizan las tipologías cafetaleras de la Reserva Natural Miraflores-Moropotente en Estelí, Nicaragua, utilizando una combinación de variables biofísicas, socioeconómicas y de manejo de los cafetales que incluyen expresamente la composición botánica y funcional del dosel de sombra. Se han realizado

¹ Basado en Zúñiga, C. 2000. Tipologías cafetaleras y desarrollo de enfermedades en los cafetales de la reserva natural Miraflores-Moropotente, Estelí, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M. Sc. en Agricultura Tropical Sostenible. 2000. Correo electrónico: czuniga71@hotmail.com.

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: esomarri@catie.ac.cr (autor para correspondencia).

⁴ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: sanchezv@catie.ac.cr

estudios similares con esta metodología en cafetales de Turrialba, en Costa Rica (Llenderal y Somarriba 1999), Carazo, Nicaragua (Bonilla y Somarriba 2000) y en el occidente de El Salvador (Escalante y Somarriba 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

La Reserva Natural Miraflores-Moropotente, Estelí, Nicaragua, se ubica a los 13°3'-13°7'N y 86°29'O; altitud entre 500 y 1400 m; zonas de bosque seco entre 500 y 1000 m de altitud y nebliselvas a elevaciones mayores. La precipitación promedio anual en la nebliselva, donde se cultiva el café, es de 1200 – 1400 mm, con una estación lluviosa entre junio y diciembre y una estación seca bien marcada entre enero y mayo. La temperatura promedio anual es de 21 °C, con una temperatura máxima promedio de 24 °C y mínima promedio de 20 °C. La humedad relativa es del 80% (PANIF 1998).

Se estudiaron 31 fincas, seleccionadas inicialmente en forma aleatoria de la lista de 115 productores de café de Miraflores. Se consideraron únicamente cafetales >1 ha, productores dispuestos a colaborar en el estudio, capaces de comunicar bien sus ideas y sus conocimientos y dedicados a su finca durante al menos los últimos cinco años. En cada finca se anotaron varias características del productor (edad, años de experiencia en el cultivo del café y fuentes de ingreso, entre otras), de la finca (área, altitud y número de meses secos, entre otras) y del cafetal (densidad, topografía, pedregosidad, edad, rendimiento, sombra, riqueza, composición y uso del dosel de sombra). En total, se utilizaron 26 variables cuantitativas para el desarrollo de las tipologías.

Los doseles de sombra se estudiaron en una parcela temporal (1000 m²) por finca, donde se contaron, identificaron botánicamente y consignaron los usos de todas las plantas de mayor altura que el café. Los usos se clasificaron en las siguientes categorías: 1) sombra (p. ej., *Inga oerstediana*); 2) musáceas (*Musa* spp.); 3) madera (p. ej., *Quercus sapotifolia*); 4) cítricos (*Citrus* spp.); 5) otros frutales (p. ej., *Mangifera indica*, *Casimiroa edulis*); 6) leña ((p. ej., *Acacia pennatula*); y 7) otros usos (medicina, fibra, resinas, etc.). La información socioeconómica se obtuvo mediante entrevistas con los productores (Zúñiga 2000).

Los datos se sometieron a análisis de correlación lineal y a un análisis de componentes principales para eliminar variables altamente correlacionadas y reducir el número de variables en el análisis de conglomerados con los que se definieron las tipologías. La disimilitud entre cafeta-

les se representó mediante distancias Gower y se aplicó el método de varianza mínima de Ward para el proceso de aglomeración. El número de conglomerados se determinó con la prueba de pseudo t^2 . Una vez formados los conglomerados o tipologías, se realizó un análisis de varianza para identificar en cuáles variables los grupos diferían significativamente entre sí. Finalmente, se aplicó un análisis discriminante y discriminante canónico a los conglomerados (Pielou 1984).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fincas, cafetales y doseles de sombra

La mayoría (74%) de las fincas cafetaleras fueron manejadas por el propietario o sus hijos (13%), y solamente el 12% por capataces asalariados. Los propietarios y capataces tuvieron un promedio de 50 años de edad, con 13,5 años de experiencia en el cultivo del café. El tamaño de las fincas varió entre 0,7 y 350 ha, con un promedio de 45 ha, pero la mediana (17 ha) resulta mejor como medida de tendencia central, ya que existieron muy pocos productores con fincas grandes. La mediana del área cultivada con café fue de 2,1 ha por finca. El 90% de los productores afirmaron que la finca era su principal actividad económica y el 71% consideró el café como la principal actividad de la finca. En 16% de las fincas cafetaleras, las actividades principales fueron el cultivo de hortalizas y de granos básicos (papa, tomate, chile, repollo, maíz y frijol) y en 13% la ganadería.

Los cafetales se ubicaron entre 953 y 1400 m (1222 m promedio) de altitud, con pendientes de 2-70% (promedio de 29%). Se cultivaron la variedad Caturra en 47% y Catuaí en 42% de las fincas; Catimor, Arabigo y Maracaturra se plantaron en pocas fincas. La densidad de plantación varió entre 3000 –5000 cafetos ha⁻¹, con un promedio de 4277 cafetos ha⁻¹. La edad promedio de los cafetales fue de 8,2 años, pero existieron muchos cafetales nuevos. Frentes fríos (48%), viento excesivo (45%) y exceso de lluvia en ciertos meses (42%) fueron mencionados como los principales problemas de los cafetales. Estas condiciones son óptimas para el desarrollo y diseminación de roya (*Hemileia vastatrix*), ojo de gallo (*Mycena citricolor*) y derrite (*Phoma costaricensis*). El manejo agronómico de los cafetales se presenta en detalle en Zúñiga (2000).

Se identificaron 63 especies vegetales en el dosel de sombra de los 31 cafetales estudiados, con un promedio de 8,5 ± 3,7 especies por finca. *I. oerstediana*, *Sapium glandulosum* y *Persea caerulea* se encontraron en uno de cada dos doseles; *Cinnamomum costaricanum*, *I. punctata*, *Nectandra*

Recuadro 1. Uso, frecuencia de aparición y porcentaje de las especies del dosel de sombra en cafetales de Mirafior, Estelí, Nicaragua

Nombre local	Nombre científico	Uso	Fincas (%)	Plantas ha ⁻¹
Guineo cuadrado	<i>Musa</i> sp2.	Musácea	16	125,2
Guineo patriota	<i>Musa</i> sp3.	Musácea	25	65,2
Plátano	<i>Musa</i> AAB	Musácea	32	61
Guama	<i>Inga oerstediana</i>	Sombra	64	33,2
Guineo caribe	<i>Musa</i> sp1.	Musácea	9	29,7
Lechoso	<i>Sapium glandulosum</i>	Sombra	58	17,1
Guama negra	<i>Inga vera</i>	Sombra	35	12,3
Aguacate colorado	<i>Persea caerulea</i>	Sombra	48	11,9
Aguacate canelo	<i>Cinnamomum costaricanum</i>	Sombra	35	10
Aguacate pachón	<i>Ocotea helicterifolia</i>	Sombra	19	9
Pacon	<i>Sapindus saponaria</i>	Sombra	25	7,4
Sangregrado	<i>Croton draco</i> ssp. <i>panamensis</i>	Sombra	32	7,4
Saray	<i>Eugenia guatemalensis</i>	Sombra	25	7,4
Aguacate	<i>Nectandra martinicensis</i>	Sombra	35	6,1
Matapalo	<i>Ficus ovalis</i>	Sombra	32	6,1
Guacimo de molenillo	<i>Luehea speciosa</i>	Sombra	22	5,5
Aguaslipe	<i>Beilschmiedia riparia</i>	Madera	16	5,2
Quitite	<i>Acnistus arborescens</i>	Sombra	29	5,2
Cacahuillo	<i>Trichilia hirta</i>	Sombra	25	4,8
Mampaz	<i>Lippia myriocephala</i>	Sombra	16	4,5
Frijolillo	<i>Senna papillosa</i>	Sombra	16	4,2
Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	Madera	12	3,9
Tatascan	<i>Perymenium grande</i>	Sombra	16	3,9
Cola de pava	<i>Cupania dentata</i>	Sombra	16	3,2
Carbon	<i>Acacia pennatula</i>	Leña	3	2,9
Guacimo de ternero	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Poste	9	2,9
Anona	<i>Annona cherimola</i>	Fruta	6	2,3
Majagua	<i>Heliocarpus appendiculatus</i>	Madera	9	1,9
Mango	<i>Mangifera indica</i>	Fruta	6	1,9
Chichicaste	<i>Urera eggersii</i>	Sombra	6	1,6
Cucaracho	<i>Cornutia pyramidata</i>	Sombra	9	1,6
—	<i>Viburnum hartwegii</i>	Sombra	3	1,6
Matorral	<i>Eupatorium pittieri</i>	Sombra	3	1,6
Zopilote	<i>Piscidia grandifolia</i>	Sombra	9	1,6
Chaperno	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	Leña	3	1,3
Chinche	<i>Zanthoxylum procerum</i>	Sombra	6	1,3
Mano de piedra	<i>Dendropanax arboreus</i>	Sombra	12	1,3

Recuadro 1. Uso, frecuencia de aparición y porcentaje de las especies del dosel de sombra en cafetales de Mirafior, Estelí, Nicaragua (*continuación*)

Nombre local	Nombre científico	Uso	Fincas (%)	Plantas ha ⁻¹
Aguja de harra	<i>Xylosma horrida</i>	Leña	3	1
Coralito	<i>Erythrina berteroa</i>	Poste	6	1
Jocote	<i>Spondias mombin</i>	Fruta	3	1
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>	Cítrico	3	1
Quebracho	<i>Lysiloma microphyllum</i>	Sombra	3	1
Alamo	<i>Styrax argenteus</i>	Leña	3	0,6
—	<i>Trophis mexicana</i>	Sombra	3	0,6
Jaboncillo	<i>Cupania cinerea</i>	Sombra	3	0,6
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	Madera	3	0,6
Tempisque	<i>Mastichodendron capiri</i>	Sombra	6	0,6
Tololo	<i>Guarea glabra</i>	Leña	3	0,6
Troton	<i>Mosquitoxylum jamaicense</i>	Sombra	3	0,6
Azucarina	<i>Calatola costaricensis</i>	Sombra	3	0,3
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	Madera	3	0,3
Comida de culebra	<i>Chomelia spinosa</i>	Madera	3	0,3
Copalchi	<i>Croton reflexifolius</i>	Sombra	3	0,3
Cuya	<i>Ardisia compressa</i>	Sombra	3	0,3
—	<i>Casearia sylvestris</i>	Sombra	3	0,3
—	<i>Neea laetevirens</i>	Sombra	3	0,3
Espino negro	<i>Pisonia macranthocarpa</i>	Sombra	3	0,3
Guarumo	<i>Cecropia peltata</i>	Sombra	3	0,3
Manzana rosa	<i>Eugenia jambos</i>	Fruta	3	0,3
Mataroncha	<i>Vismia baccifera</i>	Sombra	3	0,3
Matasano	<i>Casimiroa edulis</i>	Fruta	3	0,3
Oreja de coyote	<i>Turpinia occidentalis</i>	Sombra	3	0,3
Vara blanca	<i>Hedyosmum mexicanum</i>	Sombra	3	0,3

martinicensis, *Croton draco*, *Ficus ovalis* y plátano se encontraron en uno de cada tres doseles. La gran mayoría de las especies ocurrieron con poca frecuencia (Recuadro 1). La densidad promedio total en el dosel de sombra fue de 487 plantas ha⁻¹, con variaciones entre 160 y 2210 plantas ha⁻¹. El valor de la mediana (300 plantas ha⁻¹) reflejaba mejor la tendencia central de esta variable, dado que hubo pocas fincas con muy altas densidades (fincas con dosel de musáceas), las cuales elevaron el valor promedio.

Las musáceas (varios genotipos) ocurrieron en apenas 9-32% de las fincas, pero en estos casos fueron el componente más abundante de los doseles cafetaleros: 125 guineos cuadrados ha⁻¹ y 61-65 bananos y plátanos ha⁻¹. Las guabas (*Inga* spp.; 12-33 árboles ha⁻¹), varias especies de lauráceas (9-12 árboles ha⁻¹), *S. glandulosum*, *Eugenia guatemalensis*, *Sapindus saponaria*, *F. ovalis* y *Luehea*

speciosa fueron abundantes en los cafetales (Recuadro 1). *E. guatemalensis* fue dispersado por aves y regeneró profusamente en el cafetal; los productores regularon sus poblaciones y lo aprovecharon como leña (E. Somarriba 2000, observación personal). Un total de 30 especies tuvieron función de sombra, 13 especies maderables, siete para leña, seis frutales, cuatro variedades de musáceas (guineo cuadrado, guineo patriota o banano, guineo caribe y plátano), dos especies para postes y una sola especie de cítrico (naranja).

Tipologías cafetaleras

Se identificaron cinco tipologías de fincas cafetaleras, con diferencias y similitudes notorias entre sí (Fig. 1; Cuadro 1):

- El grupo 1 está conformado por fincas con cafetales medianos (11 ha), dosel de baja densidad total (310

Cuadro 1. Valores promedio de las variables por tipología cafetalera en la Reserva Natural Miraflores-Moropotente, Estelí, Nicaragua

Variables	Tipos de cafetales				
	1 (n = 18)	2 (n = 4)	3 (n = 4)	4 (n = 3)	5 (n = 2)
Dosel (árboles ha⁻¹)					
Sombra	202	188	65	240	50
Maderables	3	60	0	33	15
Cítricos	0	0	0	0	15
Tallos de musáceas	77	0	1248	370	505
Frutales	4	0	0	0	45
Leña	19	0	0	0	0
Otros usos	4	0	0	7	4
Total de árboles	310	245	1313	650	665
No. de especies vegetales en el dosel de sombra (1000 m ²)	8,50	9,50	4,75	13,00	9,50
Índice de Simpson	0,77	0,65	1,00	0,80	0,60
Finca					
Años de experiencia en el cultivo de café	13,66	7,50	13,50	18,33	14,50
Área cultivada de café (ha)	11,20	4,10	3,93	8,80	30,70
Rendimiento de café oro (kg ha ⁻¹)	772	1051	1134	503	1840
Número de fincas	1,22	1,25	2,00	1,66	1,50
No. de actividades económicas de la finca	1,22	1	1	1	2
No. de meses secos	4,11	4,25	4	3,66	3
Altitud de la finca (m)	1208	1300	1259	1254	1067
Pendiente (%)	32,44	12,25	34,25	34,33	16,50
Cobertura del suelo por piedras (%)	6,72	3	3,25	1,66	2,50
Plantas de café ha ⁻¹	4554	4429	3303	3951	3909
Manejo (costo en US\$ ha⁻¹)					
Fertilizantes	58,05	423	34	144,66	52
Fungicidas	11,61	801	3,25	3	1
Herbicidas	0	0	10,25	81	0
Insecticidas	0	0	5	0	0
Mano de obra	114,05	168,25	82,50	52	77,50
Materiales (plantas de resiembra)	5,16	27,50	0	51	0

plantas ha⁻¹), pocas musáceas (77 tallos ha⁻¹), riqueza media de especies en el dosel (8,5), uso mediano de mano de obra y bajo nivel de fertilización, alta densidad de cafetos (4554 cafetos ha⁻¹) y bajos rendimientos (772 kg ha⁻¹).

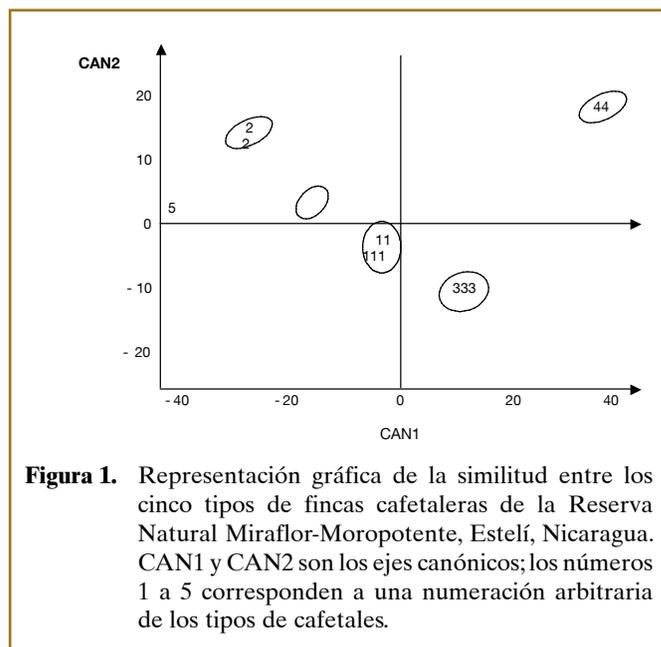
- El grupo 2 está conformado por fincas pequeñas (4 ha), dosel de baja densidad total (245 plantas ha⁻¹), sin musáceas, con maderables, riqueza mediana (9,5), uso intensivo de mano de obra, fertilizantes y fungicidas, alta densidad de cafetos (4429 cafetos ha⁻¹) y rendimientos medios (1051 kg ha⁻¹).
- El grupo 3 está conformado por fincas pequeñas (4 ha), dosel de alta densidad total (1313 plantas ha⁻¹), mayormente musáceas (1248 tallos ha⁻¹), baja densidad de especies de sombra, baja riqueza (4,75), bajo uso de mano de obra y de fertilizantes, densidad baja de cafetos (3303 cafetos ha⁻¹) y rendimientos medios (1134 kg ha⁻¹).

- El grupo 4 está conformado por cafetales medianos (9 ha), bajo doseles de bosque raleado y con mediana densidad total (650 plantas ha⁻¹), musáceas a densidades medias (370 tallos ha⁻¹), con maderables, elevada riqueza (13), bajo uso de mano de obra y mediana fertilización, densidad media de cafetos (3951 cafetos ha⁻¹) y bajos rendimientos (503 kg ha⁻¹).
- El grupo 5 está conformado por las fincas más grandes (31 ha), bajo doseles de bosque raleado y con densidad total mediana (665 plantas ha⁻¹), musáceas a densidades medias (505 tallos ha⁻¹), baja densidad de especies de sombra, presencia de maderables y cítricos, riqueza mediana (9,5), bajo uso de mano de obra y de fertilizantes, densidad media de cafetos (3909 cafetos ha⁻¹) y altos rendimientos (1840 kg ha⁻¹).

Ningún factor dominó la conformación de los conglomerados. Así, a pesar de que los cafetales de los grupos

2 y 5 fueron similares entre sí, el grupo 2 incluyó las fincas pequeñas y el grupo 5 las fincas más grandes. La presencia o ausencia de musáceas estableció la marcada diferencia entre los grupos 2 y 3. En cambio, los grupos 1 y 3 fueron similares entre sí, a pesar de la elevada densidad de musáceas en el grupo 3 y su ausencia en el grupo 1. Sin embargo, se pudo trazar un gradiente entre los cafetales del grupo 4 (los más diversos, con dosel de bosque raleado y constituido mayormente por árboles) y los cafetales del grupo 3 (poco diversos, con dosel de musáceas, muy poca riqueza y baja densidad de árboles). Los grupos 1, 2 y 5 fueron cafetales de todo tamaño, bajo bosques fuertemente raleados, con ocho a nueve especies en el dosel de sombra, densidades arbóreas y rendimientos medios, con musáceas o sin ellas.

Los cafetales más pequeños de Miraflores fueron los menos diversos, debido a la gran cantidad de musáceas que conformaron el dosel de sombra. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Escalante y Somarriba (2001) en estudios tipológicos realizados en El Salvador, no así con los publicados por Espinoza (1983) y Llanderal y Somarriba (1999) en Costa Rica, Villatoro (1986) en Guatemala, Benacchio (1987) en Venezuela y Bonilla y Somarriba (2000) en el Pacífico de Nicaragua, donde las fincas más pequeñas fueron las más diversificadas y con baja intensidad de manejo. Las dos especies de guabas (*I. oerstediana* e *I. punctata*) que abundaron en los cafetales de Miraflores fueron comunes también en los cafetales de El Salvador (Escalante y Somarriba 2001), Nicaragua (Galloway y Beer 1997, Schibli 2001) y Costa Rica (León 1998).



Gracias a su riqueza botánica y notoria complejidad estructural, los cafetales constituyen buenas herramientas para la conservación de la biodiversidad (Somarriba *et al.* 2004). Este potencial depende de un delicado balance entre la simplificación requerida para obtener rendimientos elevados de café (con poca sombra y buen manejo de la fertilidad), la diversificación (por ejemplo, bananos, aguacates y madera, entre otros) y la estructuración de la vegetación (sombra adecuada, hábitat para animales, conservación *in situ* de germoplasma vegetal valioso, etc.) para maximizar la provisión de bienes y servicios ambientales.



Cafetal con sombra en Miraflores, Estelí, Nicaragua (foto: Cristhian Zúñiga).

A pesar de los conflictos entre los administradores de la Reserva Natural Miraflores-Moropotente (muy interesados en conservar) y los productores cafetaleros (interesados en producir mucho café), los cafetales son la mejor alternativa para combinar la producción sostenible con la conservación de la biodiversidad en la Reserva. Los conflictos entre estos dos grupos de actores pueden minimizarse siguiendo algunas recomendaciones prácticas:

- Mantener niveles máximos de sombra del 50% (algunos cafetales tienen más del 80% de sombra, producen poco y adolecen de severos problemas de plagas y enfermedades).
- Ralea prioritariamente las especies más abundantes del dosel de sombra, especialmente aquellas de menor valor para conservación.
- Mantener en el dosel de sombra la mayor riqueza de especies vegetales posible, especialmente las especies nativas y aquellas de marcado interés para la conservación de la fauna (especies que proveen hábitat o alimento para especies de animales mamíferos mayores y otras especies animales de interés para la conservación, tales como aves vistosas que podrían atraer turistas).
- Reconstruir el dosel de sombra de los cafetales poco diversos; por ejemplo, aquellos dominados por musáceas, mediante la introducción —en bajas densidades— de especies arbóreas nativas, que alcancen diferentes estratos verticales, que provean productos para consumo o venta de la familia, hábitat o alimento para animales valiosos —económica y ecológicamente— y con copas anchas y ralas que favorezcan la producción cafetalera.

CONCLUSIONES

- Se identificaron cinco tipos de fincas cafetaleras y, a pesar de que ninguna variable tipológica dominó la conformación de los conglomerados, puede trazarse un gradiente entre los cafetales más diversos, con dosel de bosque raleado, y cafetales poco diversos, con muchas musáceas y poca riqueza de especies en el dosel.
- Las tipologías pueden ayudar a conciliar los intereses de la conservación de biodiversidad y de la producción cafetalera manipulando cuidadosamente la abundancia, composición florística y estructuración vertical de los doseles de sombra según el tipo de cafetal. Los cafetales ofrecen el mayor potencial de conservación de biodiversidad de todos los agroecosistemas de la Reserva Natural Miraflores-Moropotente.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164.
- Benacchio, SS. 1987. La diversificación de la producción en áreas cafetaleras: el plan de desarrollo, enfoques y perspectivas. *FONAIAP Divulga* 26:12-16.
- Bonilla G; Somarriba, E. 2000. Tipologías cafetaleras del Pacífico de Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 7(26): 27-29.
- Escalante M; Somarriba, E. 2001. Diseño y manejo de los cafetales del Occidente de El Salvador. *Agroforestería en las Américas* 8(30):12-16.
- Espinoza, PL. 1983. Estructura general de cafetales de pequeños agricultores. In Heuvelodp, J; Espinoza, L. eds. El componente arbóreo en Acosta-Puriscal, Costa Rica. Turrialba, CR, CATIE. p. 72-84.
- Galloway, G; Beer, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales de América Central. Turrialba, CR, CATIE. 168 p. (Serie Técnica. Informe Técnico No 285).
- León, J. 1998. *Inga* as shade for coffee, cacao and tea: historical aspects and present day utilization. In Pennington, T; Fernández, ECM. eds. The genus *Inga*: utilization. Kew, UK, The Royal Botanic Gardens. p. 5-13.
- Llenderal, T; Somarriba, E. 1999. Tipologías de cafetales en Turrialba, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 6(23): 30-32.
- Mejía, EJ. 1990. Caracterización y evaluación de diferencias en el manejo del cultivo del café (*Coffea arabica* L.) en dos municipios de Matagalpa, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 102 p.
- Méndez, JC ; Benoit-Catin, M. 1994. Intensificación de la caficultura de los pequeños productores de Guatemala; una tipología. *Café, Cacao, Thé* 38(2): 125-133.
- PANIF (Programa Ambiental Nicaragua-Finlandia). 1998. Diagnóstico de la situación del café. Managua, NI, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. p.1-25.
- Pielou, EC. 1984. The interpretation of ecological data: a primer in classification and ordination. New York, US, Wiley Interscience. 263 p.
- Schibli, C. 2001. Percepciones de familias productoras sobre el uso y manejo de sistemas agroforestales con café, en el norte de Nicaragua. *Revista Agroforestería en las Américas* 8(29): 8-14.
- Somarriba, E; Harvey, CA; Samper, M; Anthony, F; González, J; Staver, C; Rice, R. 2004. Conservation of biodiversity in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations. In Schroth, G; Fonseca, G; Harvey, CA; Gascon, C; Vasconcelos, H; Isaac, AMN. eds. *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes*. Washington, US, Island Press. p. 198-226.
- Villatoro, RM. 1986. Caracterización del sistema agroforestal café-especies arbóreas en la cuenca del río Achiguate. Tesis Ing. Agr. Guatemala, GT, Universidad de San Carlos. 152 p.
- Zúñiga, C. 2000. Tipologías cafetaleras y desarrollo de enfermedades en los cafetales de la reserva natural Miraflores-Moropotente, Estelí, Nicaragua. Tesis Mag. Sci. Turrialba, CR, CATIE. 68 p.

Artículos invitados

Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos¹

Damaris Suárez²; Milena Segura³; Markku Kanninen⁴

Palabras claves: área basal; *Coffea arabica*; *Cordia alliodora*; *Inga punctata*; *Inga tonduzzi*; *Juglans olanchana*; materia seca.

RESUMEN

Se desarrollaron modelos alométricos para la predicción de biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café (*Coffea arabica*) en sistemas agroforestales a partir del abatimiento y medición directa de 35 árboles y 96 plantas de café. Las especies de sombra seleccionadas fueron: *Cordia alliodora*, *Juglans olanchana*, *Inga tonduzzi* e *Inga punctata*, las cuales fueron dominantes en los cafetales (>50% del área basal). El modelo que mejor predijo la biomasa aérea total de estas especies de sombra fue: $\text{Log}_{10}(B_T) = -0,96 + 2,34 * \text{Log}_{10}(\text{dap})$ (R^2 ajustado = 0,94), donde: B_T = biomasa aérea total (kg árbol⁻¹); dap = diámetro del tallo a la altura de pecho (cm). Para plantas de café: $\text{Log}_{10}(B_T) = -1,15 + 1,66 * \text{Log}_{10}(d_{15}) + 0,54 * \text{Log}_{10}(h)$ (R^2 ajustado = 0,95), donde B_T = biomasa aérea total (kg planta⁻¹); d_{15} = diámetro del tronco a 15 cm del suelo (cm); h = altura total (m).

Estimation of aboveground biomass of shade trees and coffee plants, in agroforestry systems in Matagalpa, Nicaragua, using allometric models

Key words: Basal area; *Coffea arabica*; *Cordia alliodora*; *Inga punctata*; *Inga tonduzzi*; *Juglans olanchana*; dry matter.

ABSTRACT

Allometric models, to predict above ground biomass of shade trees and coffee plants (*Coffea arabica*) in agroforestry systems, were developed through destructive sampling of 35 trees and 96 coffee plants. The shade species were: *Cordia alliodora*, *Juglans olanchana*, *Inga tonduzzi* and *I. punctata*, the dominant species in the coffee plantations (>50% of basal area). The best model to predict the aboveground biomass of these shade species was $\text{Log}_{10}(\text{tb}) = -0.96 + 2.34 * \text{Log}_{10}(\text{dbh})$ (adjusted $R^2 = 0.94$), where tb = total above ground biomass (kg tree⁻¹); dbh = stem diameter at breast height (cm). The best model for coffee biomass was $\text{Log}_{10}(\text{tb}) = -1.15 + 1.66 * \text{Log}_{10}(d_{15}) + 0.54 * \text{Log}_{10}(h)$ (adjusted $R^2 = 0.95$), where tb = total biomass (kg plant⁻¹), d_{15} = diameter of the trunk at 15 cm above the soil (cm), and h = total height (m).

INTRODUCCIÓN

La biomasa está considerada como un parámetro importante en la caracterización de los ecosistemas, ya que refleja su capacidad de acumular materia orgánica durante un determinado período (Sarmiento 1984). Además, al igual que el aumento en la vegetación, es un componente esencial para la estimación del secuestro de carbono (Eamus *et al.* 2000). Frecuentemente, la biomasa se estima

empleando técnicas alométricas (análisis dimensional) (Eamus *et al.* 2000); los modelos alométricos expresan la biomasa del árbol como una función de parámetros fácilmente medibles, tales como el diámetro del tallo a la altura de pecho (dap), la altura total (h) o el área basal del tallo ($AB; \pi \text{dap}^2/4$) o bien, una combinación de estos (Crow 1978, Van Lear *et al.* 1984).

¹ Basado en Suárez, D. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Tesis Mag. Sc., Turrialba, CR, CATIE.

² M.Sc. en Socioeconomía Ambiental. CATIE, Sede Central. Correo electrónico: dasuarezp@yahoo.com

³ Proyecto Cambio de Uso de la Tierra y Flujos de Carbono para Centroamérica. CATIE/Universidad de Helsinki. Correo electrónico: msegura@catie.ac.cr (autora para correspondencia).

⁴ Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia. Correo electrónico: m.kanninen@cgiar.org

En general, dichos modelos se han desarrollado para su aplicación en bosques naturales y plantaciones forestales, siendo desconocida su aplicabilidad en sistemas agroforestales (SAF), donde la densidad (árboles ha⁻¹) es baja y, por ende, la competencia entre árboles también. Esta última afecta la forma y tamaño del tallo y de la copa. Además, el manejo de los árboles en SAF es intensivo, para minimizar su influencia competitiva sobre el cultivo. Por esta razón, hacen falta procedimientos alométricos capaces de proveer estimaciones más precisas y confiables de la producción de biomasa en SAF, que tomen en cuenta la influencia que pueden tener las estrategias de manejo sobre la forma de los árboles (Lott *et al.* 2000) y plantas de café. En el presente estudio, se desarrollaron modelos alométricos para estimar la biomasa aérea total en los árboles de sombra más comunes y plantas de café en SAF de café en Matagalpa, Nicaragua.



Medición de biomasa de plantas de café en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua (foto: Damaris Suárez).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la comarca Yassica Sur (85°50'00"N y 12°55'30"O), Municipio de San Ramón, Departamento de Matagalpa, Nicaragua. El área de estudio corresponde a bosque húmedo (MAG-FOR 1994). La precipitación oscila entre 1600 y 2000 mm anuales; la temperatura máxima es de 35 °C (marzo a mayo) y la mínima de 16 °C (noviembre a febrero); la altura sobre el nivel del mar varía de 400 a 1000 m. Los suelos son Alfisoles y Molisoles de textura franco arcillosa, franco limosa y arcillo limosa (Aragón y Arauz 2000). Se caracteriza por ser la principal región cafetalera, donde se concentra la mayor parte de la población del municipio.



Sistemas agroforestales en asocio con café (*Coffea arabica*) y laurel (*Cordia alliodora*) (foto: Damaris Suárez).

Se visitaron instituciones, proyectos y organizaciones de la zona para obtener una lista marco de productores, a partir de la cual se agruparon aquellas con un área $\geq 0,7$ ha, de las cuales se seleccionaron aleatoriamente 37 fincas

cafetaleras. Los sistemas de producción variaron en número y composición de especies del estrato sombra, tipo de manejo, edad, área de la plantación, variedad y densidad del café (*Coffea arabica*). En plantaciones pequeñas (<14 ha), el estrato sombra se caracteriza por tener una gran variedad de especies, entre ellas *Musa* spp., *Persea americana* (aguacate), *Citrus* spp. (cítricos), *Mangifera indica* (mango), maderables como *Cordia alliodora* (laurel), *Juglans olanchana* (nogal), *Platymiscium dimorphandrum* (coyote), *Albizia* sp. (gavilán), y especies de servicio como *Inga tonduzzi* (guaba roja) e *Inga punctata* (guaba negra). En plantaciones grandes (>35 ha), las especies del género *Inga* spp. predominan en el estrato sombra, en asocio con *Musa* spp. y/o árboles de regeneración natural, aunque la variabilidad de estos es menor. En plantaciones medianas (14-35 ha), el estrato sombra puede tener las características de las pequeñas o grandes plantaciones, o una mezcla de ambas.

Entre junio y julio, se realizó un muestreo en las fincas seleccionadas para identificar las especies de sombra más abundantes. En cada finca, se establecieron al azar una o dos parcelas temporales de muestreo (PTM), dependiendo del área de cultivo del café. Las parcelas eran cuadradas, con un área de 1000 m² cada una, para un total de 66 parcelas. Se midió el dap y la h de los árboles, y se identificó cada especie.

Se agruparon las especies dominantes del estrato sombra, que juntas contribuyen más del 50% del AB total de las parcelas. En 22 fincas, se seleccionó un total de 35 individuos (5 - 44 cm dap) de las cuatro especies dominantes, distribuidos en diferentes clases diamétricas (Cuadro 1). Se cortaron y pesaron por separado los componentes (hojas, ramas < 2 cm y ≥ 2 cm, y fuste). De

igual manera se procedió con las plantas de café, donde se seleccionaron de forma aleatoria 96 plantas en 24 fincas (2 - 10 plantas por finca), se les midió la h y el diámetro del tronco a 15 cm del suelo (d_{15}). Se cortaron y pesaron por separado las hojas, las ramas y el tronco principal. Se tomó una muestra de 250 g por componente de cada planta; se secó en horno a 60 °C por 48 horas para determinar la materia seca (%MS) y calcular la biomasa por componente. Luego, con la suma de la biomasa seca de cada componente se obtuvo la biomasa aérea total (B_T) por árbol o por planta de café. Estos muestreos destructivos se hicieron durante la estación lluviosa y antes de la cosecha de café, cuando el follaje de los árboles está en sus máximos anuales.

Se graficaron los valores de dap (o d_{15}) y h con la B_T para cada grupo de datos con el fin de analizar su tendencia. Todos los árboles fueron evaluados como un solo grupo, aunque fueran de diferentes especies. Luego, se probaron modelos de tipo exponencial, logarítmico, semilogarítmico y cuadrático, relacionando la variable dependiente (B_T) con las independientes (dap, d_{15} y h), tanto para los árboles como para las plantas de café. La selección de modelos se realizó mediante el valor del coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajustado), prueba de F (análisis de varianza), cuadrado medio del error (CME) y la lógica biológica del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron 67 especies arbóreas en el estrato sombra de los SAF, de las cuales cuatro fueron las dominantes (54% de área basal total; Cuadro 1). Estas especies fueron consideradas para desarrollar los modelos alométricos de B_T en árboles.

Cuadro 1. Número de árboles por especie y clase diamétrica muestreados en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua

Nombre científico	Nombre común	Individuos muestreados por clase diamétrica (cm)				Total	Área basal en parcelas		N (árboles ha ⁻¹)
		5 - <10	≥10 - <15	≥15 - <20	≥ 20		(m ² ha ⁻¹)	(%)	
<i>Inga tonduzzi</i>	Guaba roja	2	3	2	3	10	1,0	17	33
<i>Inga punctata</i>	Guaba negra	0	2	3	2	7	1,1	18	67
<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	2	2	1	5	10	0,7	13	21
<i>Juglans olanchana</i>	Nogal	2	2	1	3	8	0,3	6	5
Otras especies ⁽²⁾		0	0	0	0	0	2,7	46	95
Total		6	9	7	13	35	5,8	100	221

⁽²⁾ Las más importantes son: *Persea americana*, *Heliocarpus appendiculatus*, *Erythrina guaco*, *Albizia* sp., *Mangifera indica*, *Cedrela odorata*, *Gliciridia sepium*, *Lonchocarpus salvadorensis*, y *Guazuma ulmifolia*, para un total de 63 especies.

Los árboles seleccionados para desarrollar el modelo alométrico variaron entre 5 y 44 cm en el dap y de 3,5 a 635 kg en la biomasa (Cuadro 2). En promedio, la biomasa del fuste contribuye en un 52% a la B_T por árbol (lo que representa $68 \pm 21,3$ kg), seguida por las ramas ≥ 2 cm, con un 33% ($41,0 \pm 2,4$ kg), ramas < 2 cm con un aporte de 6% ($8,2 \pm 1,9$ kg) y, por último, las hojas, que representan un 8% ($10,8 \pm 8,5$ kg).

Se encontró una alta correlación entre la B_T y el dap ($r = 0,93$; $p < 0,001$; Fig. 1a), similar a la de otros estudios (Saldarriaga *et al.* 1994). Sin embargo, entre la h y la B_T se presentó una correlación baja ($r = 0,48$; $p < 0,001$; Fig. 1b). El hecho de que la h no explique en gran medida la variabilidad de la B_T en árboles podría deberse a la alteración de las copas por los tratamientos de podas que reciben frecuentemente para regular el efecto de sombra en el cultivo, además de las diferentes arquitecturas de copa y de los errores de medición.

Los modelos con transformaciones logarítmicas resultaron ser los de mejor ajuste, con valores altos de R^2 ajustados entre 0,82 y 0,94 (Cuadro 3). Se pueden diseñar muchos modelos de regresión para estimar

biomasa, pero son pocos los que cumplen las consideraciones estadísticas, de precisión y de utilidad práctica (Saldarriaga *et al.* 1994).

Con la transformación logarítmica, los parámetros de la ecuación pueden ser estimados usando procedimientos de mínimos cuadrados (Parresol 1999, Eamus *et al.* 2000) y el problema de la heterocedasticidad de la varianza de la variable dependiente puede ser corregida (Causton 1985, Saldarriaga *et al.* 1994, Eamus *et al.* 2000). Debido a la estrecha relación existente entre la B_T y el dap, autores como Bartelink (1996), Clough y Scott (1989) y Kanninen y Pérez (2002) han utilizado estos modelos como predictores de la B_T en otras especies en diferentes condiciones.

La Ecuación 4 (Cuadro 3) fue la de mejor ajuste (Fig. 1a), con el R^2 ajustado más alto y el valor más bajo del CME, lo cual indica que la diferencia entre los valores observados de la biomasa y los estimados por el modelo es menor en comparación con la Ecuación 2 y el resto de los modelos. Los valores estimados por la Ecuación 4 (Fig. 1c) se ajustan bien a los valores reales de la biomasa de los árboles.

Cuadro 2. Dimensiones y biomasa aérea total de los principales árboles de sombra en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua

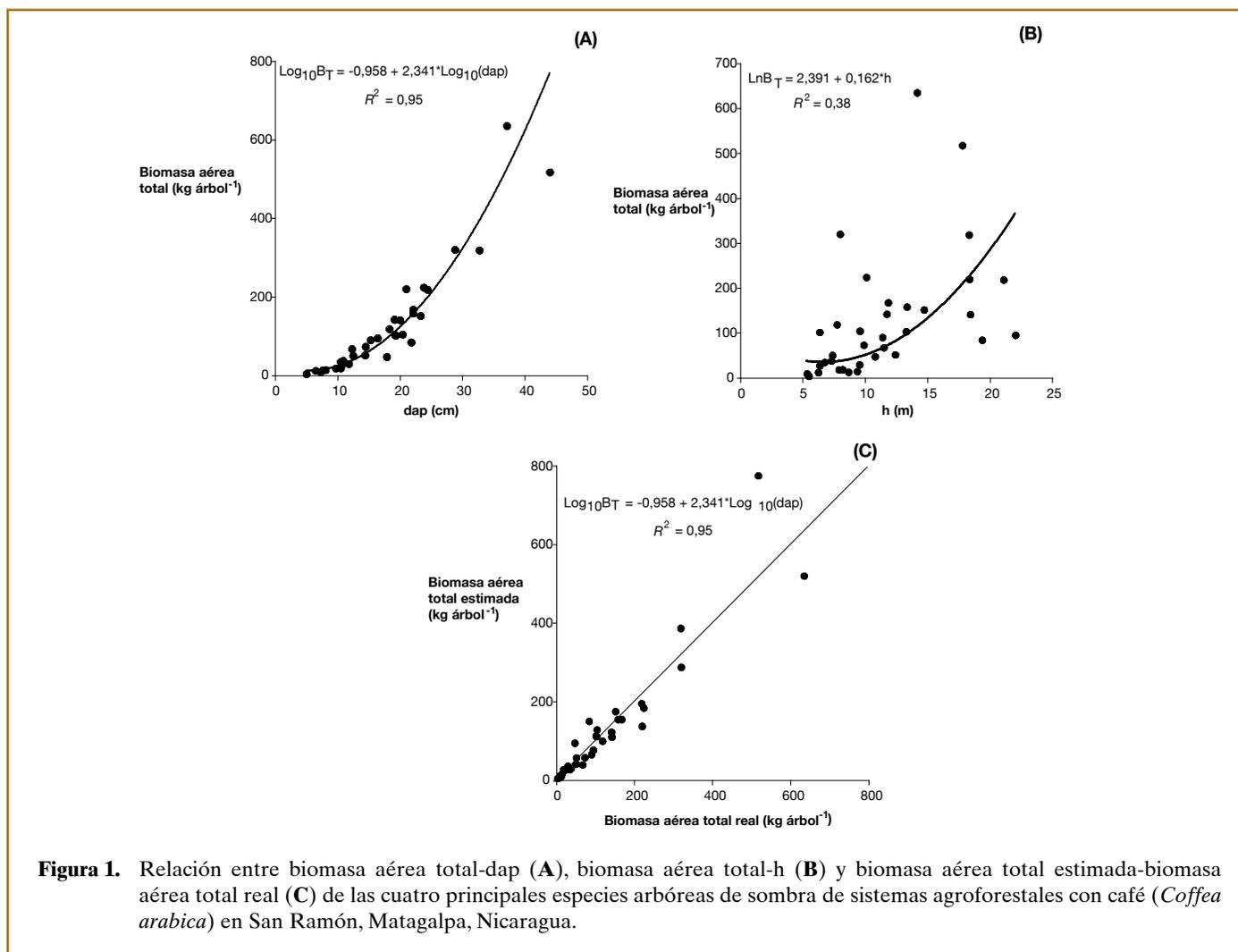
Especie	N	dap (cm)		h (m)		Biomasa aérea total (kg)	
		Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango
<i>Juglans olanchana</i>	8	17,0 (9,5)	7,3-37,1	10,8 (4,2)	5,4-18,4	142 (207)	9-635
<i>Inga punctata</i>	7	18,9 (5,9)	10,9-28,8	10,2 (5,4)	6,4-22,0	138 (99)	37-320
<i>Inga tonduzzi</i>	10	15,1 (6,2)	5,0-22,1	10,9 (4,0)	5,5-18,4	89 (69)	3-219
<i>Cordia alliodora</i>	10	20,1 (11,8)	7,6-44,0	13,5 (5,4)	6,4-21,1	141 (167)	13-517
Total	35	17,7 (8,7)	5,0-44,0	11,5 (4,7)	5,5-22,0	126 (141)	3-635

N = Número de individuos; dap = diámetro a la altura de pecho; h = altura total; desviación estándar entre paréntesis.

Cuadro 3. Modelos de mejor ajuste para estimar la biomasa aérea total de los cuatro árboles dominantes de sombra, en función del dap, en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua

Ecuación	Modelo	Parámetros		R^2	R^2 ajustado	CME
		a	b			
1	$\text{Ln}(B_T) = a + b*(\text{dap})$	2,00 (0,20)	0,13 (0,01)	0,83	0,82	0,26
2	$\text{Ln}(B_T) = a + b*\text{Ln}(\text{dap})$	-2,21 (0,27)	2,34 (0,10)	0,94	0,94	0,08
3	$\text{Log}_{10}(B_T) = a + b*(\text{dap})$	0,87 (0,09)	0,05 (0,004)	0,82	0,82	0,05
4	$\text{Log}_{10}(B_T) = a + b*\text{Log}_{10}(\text{dap})$	-0,96 (0,12)	2,34 (0,10)	0,94	0,94	0,02

Log_{10} = Logaritmo con base 10; Ln = Logaritmo natural; B_T = biomasa aérea seca total (kg); dap = diámetro del tallo a la altura de pecho (cm); a y b = parámetros del modelo; R^2 = coeficiente de determinación; CME = cuadrado medio del error. Desviación estándar de parámetros entre paréntesis.



Modelos de biomasa aérea total en plantas de café

Las plantas de café seleccionadas para la construcción de los modelos variaron entre 0,3 y 3,3 m de h; entre 0,3 y 7,4 cm en d_{15} , y entre 4,6 y 2819 g en B_T . Del total de plantas de café muestreadas, el 19% fueron plantas podadas con dos o más tallos (rebotes), originados a partir del tronco principal podado, lo cual indica que se trataba de plantas recepadas; es decir, plantas formadas por uno o dos troncos de 25-70 cm de longitud y de 2,7-7,7 cm de d_{15} , con uno o varios rebotes. Estos rebotes contribuyen con el 31% de la B_T de las plantas recepadas, mientras que las hojas, ramas y tronco lo hacen con el 15, 17 y 38%, respectivamente. Las plantas sin poda (sin recepa) representan el 81% de la muestra total; en este caso, las ramas contribuyen con el 20% del B_T , el tallo con 63%, y las hojas con el 17% (Cuadro 4).

Los modelos para estimar la B_T en función del d_{15} y/o la h presentaron buen ajuste con valores de R^2 ajustados entre 0,94 y 0,95 (Cuadro 5). La Ecuación 8, con transformación logarítmica en todas sus variables, es la que mejor predice la B_T de las plantas de café muestreadas, con el valor más alto de R^2 ajustado y CME más bajo (Cuadro 5, Fig. 2c).

La Ecuación 8 presenta el mejor ajuste gracias a la inclusión de dos variables independientes (d_{15} y h), además de la transformación logarítmica de sus variables. Según Saldarriaga *et al.* (1994), para obtener una mayor precisión de los estimados se pueden introducir más variables en la ecuación de regresión, pero la inclusión de varias variables independientes, como el dap y la h, puede llevar a problemas de colinealidad. Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio indican que la correlación entre estas dos variables es baja, lo cual puede ser explicado por los tratamientos de poda que reciben las plantas.

Cuadro 4. Características dasonométricas y B_T de las plantas de café (*Coffea arabica*) muestreadas en sistemas agroforestales en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua ($N = 96$)

Variable	Plantas sin recepa ($N = 78$)		Plantas recepadas ($N = 18$)		Total ($N = 96$)	
	Rango	Promedio ($\pm s$)	Rango	Promedio ($\pm s$)	Rango	Promedio ($\pm s$)
Altura total (m)	0,3-3,3	1,6 (0,7)	1,1-2,6	1,8 (0,4)	0,3-3,3	1,6 (0,7)
d_{15} (cm)	0,3-7,4	2,7 (1,4)	1,7-6,8	3,9 (1,5)	0,3-7,4	3,0 (1,5)
Biomasa ramas (g)	0,3-857	115 (131)	52-821	270 (185)	0,3-857	144 (154)
Biomasa tallo (g)	2-1269	365 (331)	149-998	497 (267)	2-1269	390 (323)
Biomasa hojas (g)	2-421	95 (79)	229-592	238 (148)	2-592	125 (109)
Biomasa troncos (g)	—	—	283-1269	619 (248)	269-283	619 (248)
Biomasa aérea total (g)	5-2238	656 (584)	166-2819	1108 (840)	5-2819	741 (659)

s = Desviación estándar (entre parentésis).

Se presentó una correlación alta ($r = 0,84$) entre la B_T y d_{15} (Fig. 2a), mientras que con la h esta fue menor ($r = 0,63$) (Fig. 2b) ($p < 0,001$).

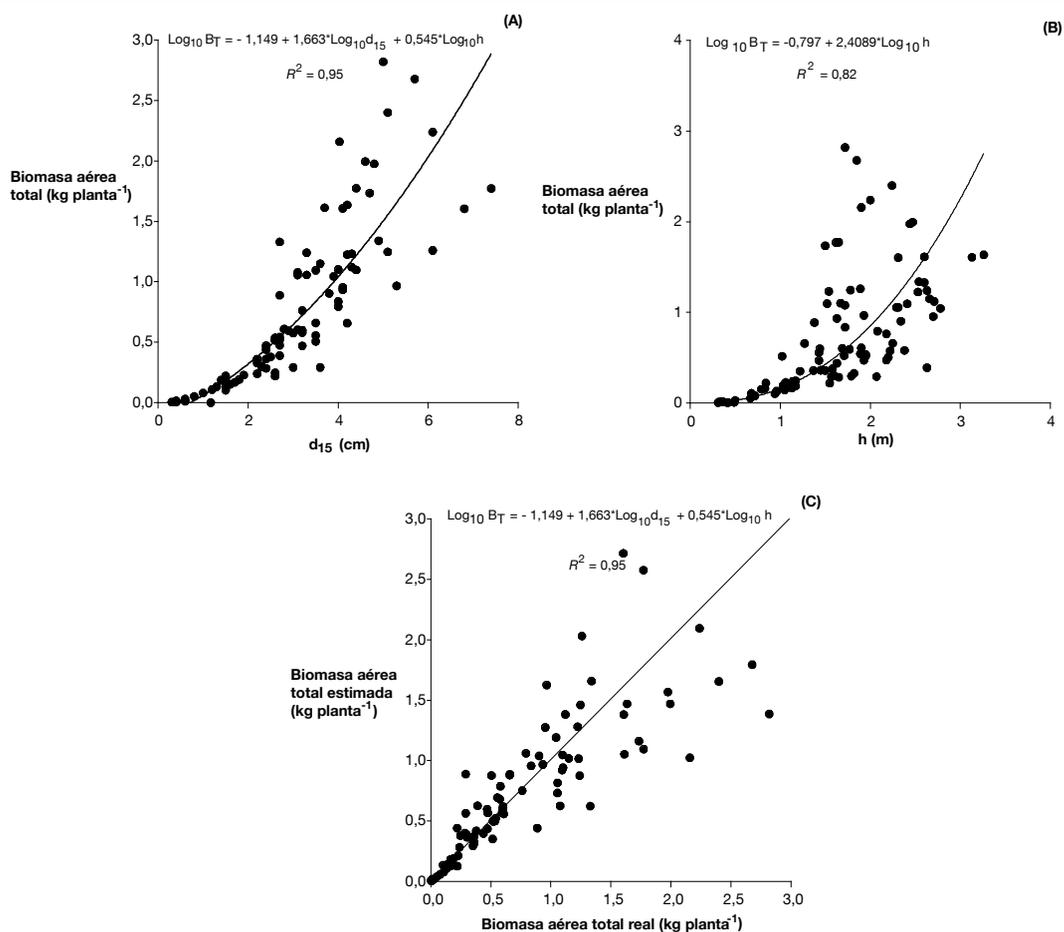


Figura 2. Relación entre biomasa aérea total- d_{15} (A), biomasa aérea total-h (B) y biomasa aérea total estimada-biomasa aérea total real (C) de las plantas de café (*Coffea arabica*) en sistemas agroforestales en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua.

Cuadro 5. Modelos de mejor ajuste para estimar B_T en plantas de café (*Coffea arabica*) en sistemas agroforestales en San Ramón, Matagalpa, Nicaragua

Ecuación	Modelo	Parámetros			R^2	R^2 ajustado	CME
		a	b	c			
5	$\text{Ln}(B_T) = a + b \cdot \text{Ln}(d_{15})$	-2,79 (0,06)	2,05 (0,05)		0,94	0,94	0,14
6	$\text{Log}_{10}(B_T) = a + b \cdot \text{Log}_{10}(d_{15})$	-1,21 (0,03)	2,05 (0,05)		0,94	0,94	0,03
7	$\text{Ln}(B_T) = a + b \cdot \text{Ln}(d_{15}) + c \cdot \text{Ln}(h)$	-2,65 (0,07)	1,66 (0,11)	0,54 (0,14)	0,95	0,95	0,12
8	$\text{Log}_{10}(B_T) = a + b \cdot \text{Log}_{10}(d_{15}) + c \cdot \text{Log}_{10}(h)$	-1,15 (0,03)	1,66 (0,11)	0,54 (0,14)	0,95	0,95	0,02

Ln = logaritmo natural; Log_{10} = logaritmo con base 10; B_T = biomasa aérea total (kg); d_{15} = diámetro del tronco a 15 cm del suelo (cm); h = altura total de la planta (m). Desviación estándar de parámetros entre paréntesis.

Las plantas de café, con excepción de las plantas jóvenes (<3 años), reciben tratamientos de poda como parte del manejo cultural de la plantación. La intensidad de la poda puede ser parcial, lo cual implica el desprendimiento de la parte terminal del tallo o las ramas viejas del resto de la planta, con el fin de inducir el desarrollo de nuevas ramas o bandolas y obtener mayores niveles de producción por planta. En cambio, al renovar las plantas viejas o enfermas de una plantación se lleva a cabo una poda total; es decir, las plantas son recepadas para obtener rebrotes que sustituyen la planta original. Este manejo aumenta la variabilidad de los datos y los ajustes de los modelos, especialmente para plantas de mayor d_{15} (mayor biomasa), las cuales son también las mayores de edad y, por lo tanto, en la mayoría de los casos, las recepadas (Cuadro 4).

Sin embargo, un modelo más simple, que exige menos esfuerzo de medición en el campo (modelo 6; mide solo d_{15}), ofrece una precisión muy semejante y podría ser la mejor opción. Al comparar los valores de la biomasa real con los estimados por el modelo de mejor ajuste, los valores simulados se ajustan a la recta, lo cual indica que la mayor parte de los valores estimados están muy cerca del valor real (Fig. 2c).

CONCLUSIONES

- El modelo alométrico de mejor ajuste para estimar la B_T de árboles de sombra de café proporciona estimaciones consistentes y relaciones lógicas entre el dap y la B_T , ya que más del 90% de la variabilidad encontrada en la B_T es explicada por el dap. Además, es un modelo práctico, ya que considera un parámetro fácilmente mensurable en el campo, como lo es el dap. Su aplicación en otras especies y bajo diferentes condiciones agroecológicas debe ser verificada primero.
- El modelo de mejor ajuste de B_T en café también proporciona estimaciones consistentes y relaciones lógicas entre el d_{15} y la h con la B_T . Aunque se requieren datos de h y d_{15} de los cafetos para emplearlo, es un modelo muy práctico. Su aplicación en plantas con características diferentes a las de este estudio debe ser comprobada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Proyecto Cambio de Uso de la Tierra y Flujos de Carbono para Centroamérica (LUCCAM) de la Academia de Finlandia por el apoyo financiero (becas número 67843 y 201566) y científico en esta investigación; al proyecto CATIE-MIP/NORAD, Nicaragua, por la beca para realizar estudios de maestría y el apoyo logístico; a los productores cafetaleros de la comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua, por la colaboración brindada en la fase de campo, y a Hernán J. Andrade (estudiante de Ph.D. del programa CATIE/UWB) por sus valiosos aportes al documento.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aragón, OIA; Arauz, UJA. 2000. Balance aparente de nutrientes (N, P, K) en dos unidades de producción ubicadas en el municipio de San Ramón, departamento de Matagalpa, durante el período 1997-1999. Tesis Ing., Managua, NI, Universidad Nacional Agraria. 85 p.
- Bartelink, HH. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas fir. *Forest Ecology and Management* 86: 193-203.
- Causton, DR. 1985. Biometrical, structural and physiological relationship among tree parts. In Cannell, MGR; Jackson, JE. eds. *Attributes of trees as crop plants*. Inst. Terrestrial Ecology, Huntingdon. 137-159 p.
- Clough, BF; Scott, K. 1989. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management* 27: 117-127.
- Crow, TR. 1978. Common regressions to estimate tree biomass in tropical stands. *Forest Science* 24: 110-114.
- Eamus, D; McGuinness, K; Burrows, W. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. National Carbon Accounting System. 56 p. (Technical report No. 5a).
- Kanninen, M; Pérez, LD. 2002. Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 165: 1-9.
- Lott, JE; Howard, SB; Black, CR; Ong, CK. 2000. Allometric estimation of above-ground biomass and leaf area in managed *Grevillea robusta* agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 49: 1-15.
- MAG-FOR. 1994. Marco geográfico y microlocalización de la franja granífera de San Ramón- Esquipulas del departamento de Matagalpa. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Programa Alimentario Nicaragüense, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Septiembre, 1994.
- Marín, C. 1997. Nicaragua, Potencialidades y limitaciones de sus territorios. Ministerio de agricultura y ganadería (MAG-FOR). Dirección general de información y apoyo al productor. Dirección de Servicios Territoriales. Octubre, 1997. 170 p.
- Parresol, BR. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45(4): 573-593.
- Saldarriaga, JG; María, OJP; Louis, WHJ. 1994. Evaluation of regression models for aboveground biomass determination in the Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology* 10: 207-218.
- Sarmiento, G. 1984. Los ecosistemas y la ecosfera. Barcelona, Editorial Blume, 272 p.
- Van Lear, DH; Waide, JB; Trueke, MJ. 1984. Biomass and nutrient content of a 41 year old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation on a poor site in South Carolina. *Forest Science* 30: 395-404.

¿Cómo hacerlo?

¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales?

Eduardo Somarriba¹

Palabras claves: composición botánica; diversificación; estructura vertical y horizontal; movimiento solar; *Theobroma cacao*.

RESUMEN

Se presenta una metodología para evaluar y mejorar el dosel de sombra en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*). El análisis se lleva a cabo partiendo de tres preguntas básicas: 1) ¿qué bienes y servicios, además del cultivo principal, espera el productor obtener de su cacaotal?; 2) ¿cuál es el máximo de sombra que deben las plantas del dosel proyectar de modo que se logren las expectativas de rendimientos del cultivo principal?; 3) ¿cuáles especies, en qué densidades, en qué arreglos de plantación y con qué manejo deben introducirse en el dosel para lograr en forma óptima los objetivos del productor? Esta metodología es directamente aplicable en otros sistemas agroforestales multiestratos.

How to evaluate and improve the shade canopy of cocoa?

Key words: Botanical composition; diversification; vertical and horizontal structure; solar movement; *Theobroma cacao*.

ABSTRACT

A methodology to evaluate and improve the shade canopy of cacao (*Theobroma cacao*) plantations is presented. The analysis is carried out using three basic questions: 1) What goods and services, apart from cacao, does the farmer hope to obtain from the plantation?; 2) How much shade should the upper canopy trees project in order to assure an acceptable cacao yield?; 3) which species, in what density, in what plantation arrangement and under what management should be introduced into the shade canopy in order to achieve the objectives of the farmer in the optimum way? This methodology is directly applicable to other multi strata agroforestry systems.

INTRODUCCIÓN

Los pequeños productores de cacao (*Theobroma cacao*) de todo el mundo plantan, seleccionan de la regeneración natural o retienen del bosque original varias especies de plantas útiles para dar sombra al cacao, en variados diseños agroforestales, que responden a sus intereses y condiciones agroecológicas y socioeconómicas particulares (Rice y Greenberg 2000, Somarriba y Harvey 2003, Bentley *et al.* 2004, Somarriba *et al.* 2004). La mayoría de las plantas son árboles, pero también se incluyen diferentes especies de bambú, palmas, arbustos y hierbas gigantes (por ejemplo, bananos y plátanos) que valorizan la propiedad, y proveen de madera, leña, aceites, frutas, medicina, fibras, rito, ornato y otros bienes y servicios de utilidad directa para la venta, el consumo de la familia o de uso en la finca (Shepherd *et*

al. 1977, Ramadasan *et al.* 1978, Oladokun y Egbe 1990, Ekenade y Egbe 1990, Herzog 1994, Amoha *et al.* 1995, Asare 2004). Sin embargo, no todas las plantas del dosel tienen utilidad para el productor (Herzog 1994, Bentley *et al.* 2004, Somarriba *et al.* 2004).

La concurrencia simultánea de árboles y cultivos (cacao, bananos, cítricos, etc.) en la plantación de cacao da lugar a numerosas interacciones ecológicas, agronómicas y económicas que se han evaluado en varios experimentos de largo plazo y han sido objeto de varias revisiones temáticas (Cook 1901, Willey 1975, Gogoi 1977, Beer 1987, Somarriba *et al.* 2004). Por ejemplo, las interacciones entre sombra, fertilidad, recirculación de nutrientes, plagas y enfermedades, agronomía y rendi-

¹ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. esomarri@catie.ac.cr

mientos han sido estudiadas en Ghana, Trinidad, Papua Nueva Guinea, Costa Rica y otras regiones del mundo (Cunningham 1959, 1963, Hurd y Cunningham 1961, Hardy 1962, Cabala *et al.* 1972, Fordham 1972, Dakwa 1980, Ampofo y Bonaparte 1981, Smith 1981, Alpízar *et al.* 1986, Fassbender *et al.* 1988, Heuveldop *et al.* 1988, Imbach *et al.* 1989, Somarriba y Beer 1999). Los sistemas de producción de cacao y los listados de las especies de sombra utilizadas en varias regiones cacaoteras del mundo han sido descritos en varias publicaciones (ver referencias en Beer 1987, Asare 2004). El valor ecológico del cacaotal para conservar la biodiversidad, fijar carbono atmosférico y mitigar el efecto invernadero, conservar suelos y aguas, amortiguar zonas protegidas de interés nacional e internacional y proveer otros servicios ambientales ha sido objeto de varias publicaciones recientes (Beer *et al.* 2003, Somarriba *et al.* 2004).

A pesar de su potencial y valor, muchos cacaotales poseen doseles subóptimos o francamente deficientes que impiden al productor lograr satisfactoriamente sus objetivos. A continuación, se presenta una metodología para analizar y mejorar los doseles de sombra y, de este modo, lograr los objetivos del productor.

TERMINOLOGÍA

En este artículo se utilizan los siguientes términos: (1) *árboles*, para incluir varios tipos de plantas y hábitos de crecimiento, como árboles, arbustos, palmas, bambúes y hierbas gigantes, como los bananos y plátanos;

(2) *cacaotal* equivale a la plantación de cacao, es decir, incluye las plantas de cacao y de otras especies; (3) *dosel* es el volumen que contiene a toda la vegetación de la plantación. Por ejemplo, un cacaotal de 1 ha (100 x 100 m) con al menos un árbol de sombra de 30 m de altura máxima está contenido en un cubo de 100 m de largo x 100 m de ancho x 30 m de alto (Fig. 1); y (4) *sombra* se refiere únicamente a los cambios en la cantidad, calidad y distribución temporal y espacial de la radiación solar dentro de la plantación provocados por la intercepción de luz por las copas de los árboles, barreras topográficas y vegetación colindante a la plantación y nubosidad local. El concepto “sombra” ha sido utilizado también para describir el conjunto de cambios en el microclima de la plantación, que además de cambios en la radiación solar incluye cambios en el viento, humedad relativa, temperatura, luz ultravioleta, etc.

EL ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DEL DOSEL

El dosel de una plantación se evalúa respondiendo a tres preguntas básicas:

- ¿Qué bienes y servicios, además del cacao, espera el productor obtener de su cacaotal?
- ¿Cuánta sombra deben proyectar las plantas del dosel para que el cacao produzca a un nivel aceptable para el productor?
- ¿Cuáles especies, en qué densidades, en qué arreglos de siembra y con qué manejo deben introducirse en el dosel para lograr en forma óptima los objetivos del productor?

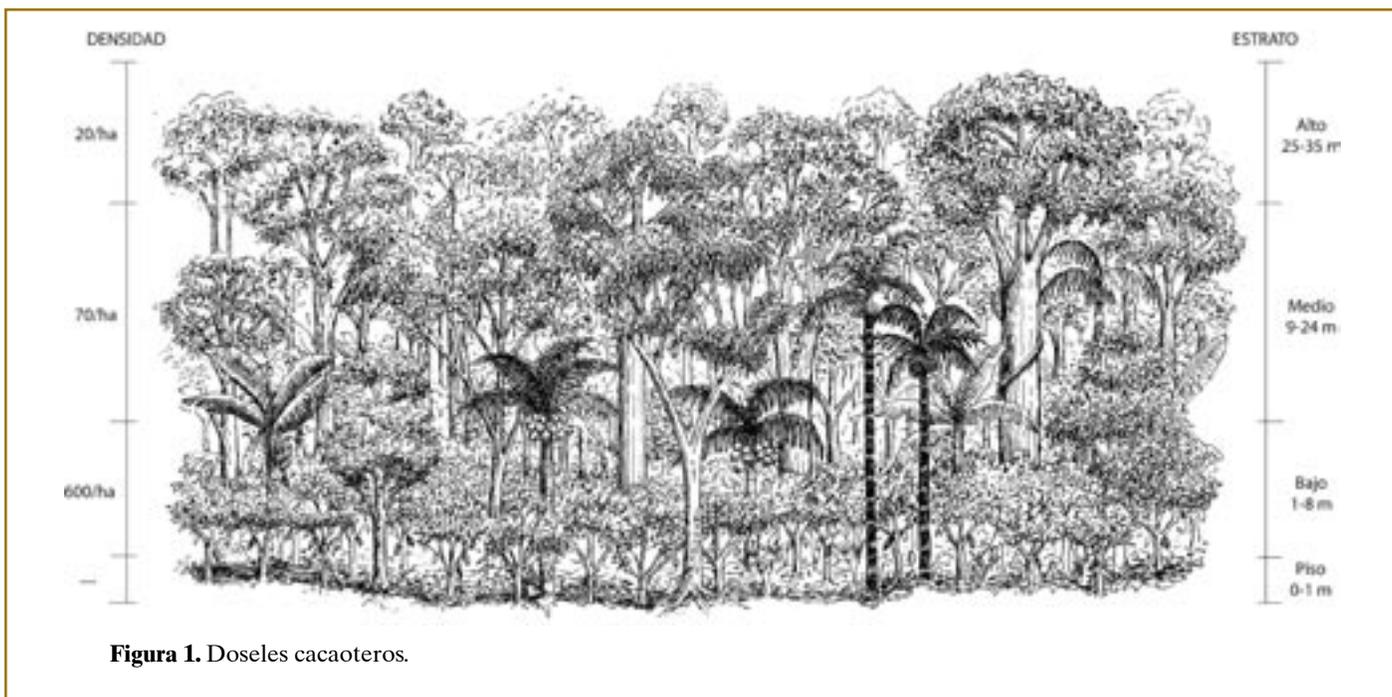


Figura 1. Doseles cacaoteros.

¿Qué bienes y servicios espera obtener el productor de su cacaotal?

Los intereses pueden ser muy variados, pero se puede determinar si la plantación satisface en forma óptima los intereses del productor simplemente enunciando claramente estos intereses y contrastándolos con la composición botánica, los usos y la abundancia de las plantas del dosel. Por ejemplo, algunos productores permiten el establecimiento de los árboles de ciertas especies porque producen frutos para las aves; otros árboles se dejan porque se regeneran abundantemente en forma natural y son fuente de madera de aserrío o leña (p. ej., el laurel —*Cordia alliodora*— y cola de pava —*Cupania cinerea*— en los cacaotales de Bocas del Toro, Panamá; Somarriva y Harvey 2003). Varias especies de guaba (*Inga* spp.), poró (*Erythrina* spp.) y madero negro (*Gliricidia* spp.), clasificadas como “árboles de servicio” (al cacao), se plantan deliberadamente para proveer sombra (Rice y Greenberg 2000). Muchas especies se plantan o seleccionan de la regeneración natural para proveer una combinación de productos y servicios, incluyendo fruta, fibra, hábitat para fauna, mejorar la fertilidad del suelo, conservar suelos y agua, fijar carbono y proveer varios otros servicios ambientales, reducir gastos en efectivo o minimizar el riesgo financiero, entre otros (Rice y Greenberg 2000, Ramírez *et al.* 2001, Beer *et al.* 2003, Bentley *et al.* 2004).

¿Cuánta sombra deben proyectar las plantas del dosel?

Los siguientes cuatro factores intervienen en la determinación del nivel de sombra que deben proyectar las plantas del dosel para que el cacao tenga una buena producción: (1) el ciclo de vida y el ciclo fenológico anual del cacao; (2) las condiciones del sitio; (3) el manejo agronómico del cacao; y (4) las características del dosel.

1) Ciclo de vida y ciclo anual del cultivo

- *Ciclo de vida.* Las plantas jóvenes de cacao requieren de más sombra del dosel durante los primeros años de vida, debido a que sus copas son pequeñas, no ocupan totalmente el espacio de crecimiento disponible, reciben más radiación solar de la que pueden utilizar en la fotosíntesis, se calientan excesivamente, pierden agua y aumenta su probabilidad de morir. A medida que las plantas crecen y desarrollan sus copas, las hojas de las ramas superiores sombrean las hojas de las ramas bajas, produciendo auto-sombra y reduciendo el nivel de sombra deseable de las plantas del dosel. Los agrónomos cacaoteros recomiendan 50-60% de sombra en los primeros dos años de edad del cacaotal y luego

reducirla paulatinamente a medida que el cacao desarrolla su copa, hasta un rango del 20-40% en plantaciones adultas de más de ocho años de edad (Compañía Nacional de Chocolates 1988, Gramacho *et al.* 1992, Arévalo *et al.* 2004, Enriquez 1985, 2004, DEVIDA-CICAD 2004). El uso de sombras temporales (gandules —*Cajanus cajan*—, bananos y plátanos, higuierilla —*Ricinus communis*—, yuca —*Manihot esculenta*— y otros cultivos anuales de rápido crecimiento y porte bajo) durante la fase de establecimiento de las plantaciones es una práctica común en el cultivo del cacao (Oladokun 1990).

- *Ciclo anual, ciclo agronómico o ciclo fenológico.* El cacao requiere de más radiación solar durante la floración y el llenado de los frutos que en cualquier otra etapa del ciclo fenológico anual (Alvim 1984). Por esto, un buen dosel debe proveer niveles variables de sombra durante el año en forma sincronizada con el ciclo fenológico del cacao. En cacaotales con sombra mono-específica de una especie leguminosa de servicio, como *Inga* spp., *Erythrina* spp. o *Gliricidia* spp., los árboles se podan, descopan y ralean de acuerdo con las necesidades del cacao. Cuando las plantas que dan sombra al cacao son especies frutales o maderables que limitan la capacidad de podar/ralear para dar luz al cultivo sin sacrificar su propia producción, los productores ajustan la sombra del dosel a las demandas del cacao, seleccionando especies que pierden el follaje en las épocas en que el cultivo necesita mucha radiación solar, utilizando monocultivos o mezclas de especies arbóreas para lograr determinados patrones temporales de caducifolia en el dosel, manipulando los arreglos y espaciamientos de siembra y aplicando raleos bien diseñados para abrir el dosel al máximo, sacrificando al mínimo la producción de fruta o madera.

2) Las condiciones del sitio que afectan la sombra en la plantación

No toda la sombra que reciben las plantas de cacao proviene de las plantas del dosel. Las siguientes características del sitio modifican la cantidad de radiación que recibe una plantación y tienen implicaciones directas sobre la densidad de plantas por mantener en el dosel: a) latitud, exposición y pendiente; b) nubosidad local; y c) sombra lateral.

- *Latitud, exposición y pendiente.* Debido a la traslación de la tierra alrededor del sol a lo largo del año, al ángulo de inclinación del eje polar de la tierra con respecto al plano del ecuador solar y a la rotación

diaria de la tierra sobre su eje polar, la posición del sol cambia continuamente a lo largo del año y durante las horas del día. Dos observadores en diferentes latitudes, en un mismo día y hora, observan el sol moverse con diferentes ángulos. El movimiento del sol a lo largo del día y del año es percibido de manera particular en cada punto sobre la Tierra, o en cada cacaotal sobre la Tierra. La posición del sol observada desde la plantación tiene efectos importantes sobre la radiación que llega al cultivo. Si conocemos exactamente la posición latitudinal de un árbol, podemos determinar la posición del sol con base en dos ángulos: azimut (z) y altura solar (α). Las ecuaciones requeridas para determinar estos ángulos (Fig. 2) son (Quesada *et al.* 1987):

$$\delta = 23,45 * \text{sen}(360 * (284 + N) / 365) \quad [1]$$

$$\text{sen } \alpha = \text{sen} \phi \text{sen} \delta \text{sen} \tau - \text{cos} \phi \text{cos} \delta \text{cos} \tau \quad [2]$$

$$\text{cos } z = (\text{sen} \delta - \text{sen} \phi \text{sen} \alpha) / (\text{cos} \phi \text{cos} \alpha) \quad [3]$$

Donde:

δ = declinación solar medida en grados

N = día del año (día 1 es 1 enero)

α = altura solar medida en grados (0-90)

ϕ = latitud en grados, con signo negativo en el Hemisferio Sur

τ = ángulo horario, medido en grados desde -90 hasta $+90$, negativos por la mañana y positivos por la tarde (6 am es -90 , 7 am es 75 , 12 mediodía es 0 , 1 pm es $+15$ y así hasta $+90$ a las 6 pm)

z = azimut, medido en grados sobre el terreno entre el Norte magnético del árbol y el plano que contiene al ángulo de altura solar (0-360).

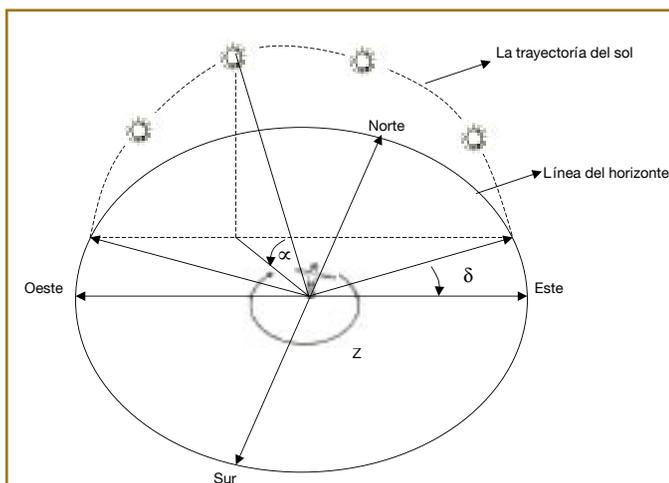


Figura 2. Ángulos que describen la posición del sol vista desde un observador.

Z = azimut (0-360°); δ = declinación ($-23^{\circ}30'$ - $+23^{\circ}30'$); α = altura solar (0-90°).

Ahora veamos algunas consecuencias de estas ecuaciones. Imaginemos una fila montañosa con orientación norte – sur, de modo que la ladera derecha de la cordillera tiene fachada hacia el este, hacia donde sale el sol, y la ladera izquierda hacia el oeste, hacia donde se oculta el sol. En cada ladera se ha establecido un cacaotal. Si las laderas son lo suficientemente altas, muy inclinadas o una combinación de ambas, una plantación en la ladera este recibirá directamente los rayos solares durante la mañana y sombra por la tarde; la plantación en la ladera oeste recibirá sombra por la mañana e insolación directa por la tarde (Fig. 3). Si se rota la cordillera y su eje queda en dirección este – oeste, de modo que la ladera derecha tenga fachada hacia el norte y la izquierda hacia el sur (Fig. 4), la insolación de los cacaotales en las laderas será similar en la mañana y en la tarde, pero variará a lo largo del año. El movimiento aparente del sol a lo largo del año y la ubicación latitudinal de la plantación determinan la declinación y altura máxima del sol y provocan que una ladera reciba iluminación directa durante más meses del año que la otra. Por ejemplo, en el Hemisferio Sur (digamos, en Bolivia a 16°S) las plantaciones en laderas con exposición norte reciben iluminación directa del sol durante ocho meses del año, mientras que las plantaciones con fachada hacia el sur reciben iluminación directa apenas cuatro meses del año. Lo contrario ocurre en plantaciones en el Hemisferio Norte, donde las laderas con exposición al sur reciben más iluminación directa del sol que las laderas con exposición norte (Fig. 4).

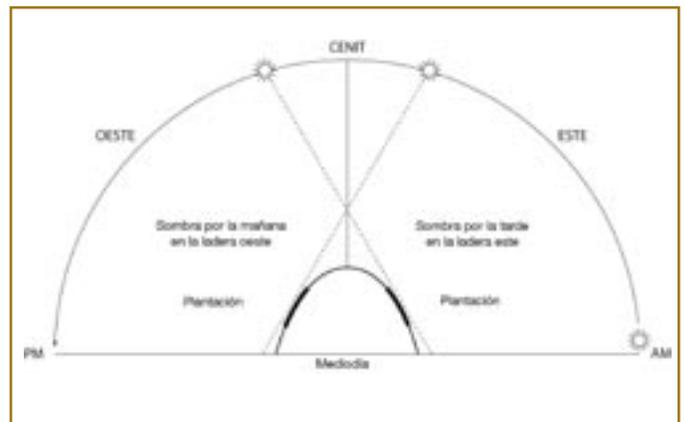


Figura 3. Efecto de las cordilleras con rumbo norte-sur sobre la iluminación diaria de cacaotales plantados en las laderas.

La pendiente modifica la “velocidad de tránsito” de la sombra sobre el suelo. Por ejemplo, si a mitad de una ladera con fachada hacia el este y plantada con cacao

se establece una hilera de árboles con orientación norte – sur, durante la mañana las sombras de las copas se proyectarán hacia arriba en la pendiente y bajarán la pendiente a medida que el sol se eleve durante el día. Por la tarde, a medida que el sol descende, la sombra transitará sobre el suelo, hacia abajo, con velocidad creciente; la forma de la sombra se alargará y se estirará a medida que se aleje de la base del árbol (al estirarse la sombra aumenta su superficie y eso reduce la “densidad” de la sombra sobre el suelo). El número de horas sombra día⁻¹ que recibe cada punto sobre la franja de terreno por donde transita la sombra es inversamente proporcional a la velocidad de tránsito de la sombra sobre el punto en el suelo. Los productores cacaoteros conocen este efecto y mantienen un menor número de plantas en el dosel arriba en la pendiente, donde las sombras se mueven lentamente. Las variaciones en la velocidad de tránsito de la sombra en terrenos inclinados son equivalentes a las producidas en terrenos planos al cambiar la altura a la que se encuentra la copa.

- *Nubosidad local.* Las nubes bloquean directamente los rayos solares que llegan a la plantación y obligan al productor a podar severa y frecuentemente las plantas del dosel o a mantener bajas densidades de plantas para reducir la sombra. La nubosidad puede estar correlacionada con la pluviosidad local o no. Por ejemplo, en zonas cafetaleras muy húmedas de Turrialba, Costa Rica (10°N), con precipitación anual de 3500 mm, la duración del brillo solar es de apenas cuatro horas por día, por lo que el café debe cultivarse con bajas densidades de árboles de sombra. En cambio, en la región cacaotera del Alto Beni, Bolivia (16°S), los meses de otoño (abril - junio) se caracterizan por su elevada nubosidad, temperaturas bajas y casi nula precipitación pluvial. Sin embargo, los productores no podan ni reducen la densidad de los árboles de sombra porque los siguientes meses de invierno (julio – septiembre), aunque fríos, son muy secos, sin nubes y con alta radiación solar (E. Somarriba, observaciones personales). La fijación del nivel de sombra en función de la nubosidad local toma además en cuenta que las nubes y la humedad que conllevan modifican la severidad de la incidencia de ciertas enfermedades.

- *Sombra lateral.* La vegetación colindante y las barreras topográficas cercanas a un cacaotal pueden proyectar sombra lateral sobre la plantación y forzar al productor a podar o disminuir la densidad de las plantas del dosel para reducir la sombra. La cantidad de sombra lateral proyectada sobre la plantación depende de la

altura y densidad de la vegetación colindante y de su posición con respecto al movimiento del sol. La utilización de barreras arbóreas para proyectar sombra lateral es una práctica de manejo de uso común en cafetales en sitios nubosos y ventosos (Somarriba *et al.* 2004).

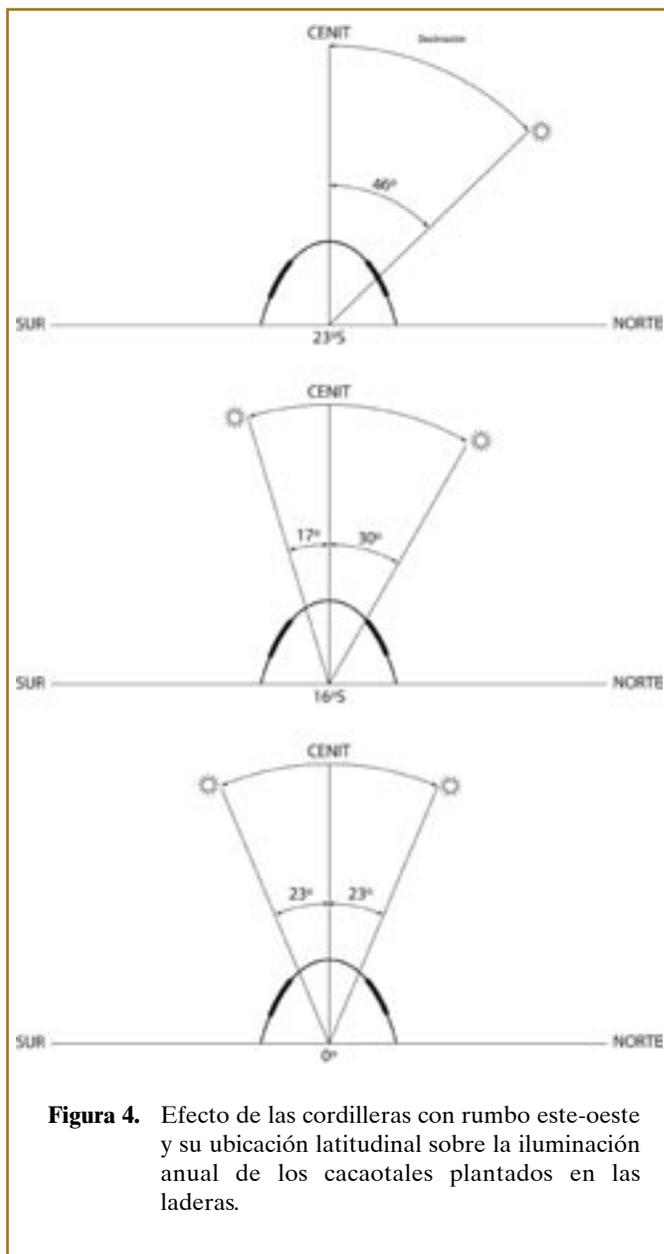


Figura 4. Efecto de las cordilleras con rumbo este-oeste y su ubicación latitudinal sobre la iluminación anual de los cacaotales plantados en las laderas.

Aunque hemos analizado en forma independiente la influencia de la latitud, exposición, pendiente y vegetación colindante sobre la sombra que recibe una plantación, en la práctica estos factores actúan en forma simultánea y combinada.

3) Manejo agronómico del cacao

- *Auto-sombra.* La arquitectura de la planta de cacao, ya sea producida por injerto o mediante semilla sexual, los distanciamientos y arreglos de plantación y el desarrollo y manejo de las copas (tipo, frecuencia e intensidad de podas) determinan la auto-sombra en la plantación. Plantaciones de semilla sexual, con alta densidad de siembra y poca poda, resultan en altos niveles de auto-sombra y requieren, por ende, de pocas plantas en el dosel.

- *El rendimiento esperado del cultivo principal.* El rendimiento de una planta de cacao es determinado por el equilibrio entre la cantidad de radiación solar que recibe y por la fertilidad (natural o artificial) de que dispone. Altos rendimientos exigen mantener altos niveles de radiación solar (poca sombra) y elevada fertilidad del suelo. En suelos de baja fertilidad se recomienda cultivar el cacao bajo sombra para atenuar las demandas nutricionales del cultivo (Beer 1987).

- *Plagas, enfermedades o eventos climáticos extremos.* Estos factores pueden determinar el nivel de sombra permisible en una determinada región cacaotera. Por ejemplo, en países afectados por huracanes o tifones, los árboles altos se quiebran o caen durante las tormentas y los mejores doseles son aquellos que incluyen plantas de servicio de porte bajo y plantados a baja densidad en el cacaotal (E. Somarriba y J. Beer, observaciones personales en Belice y Fiji). Varios ejemplos en cafetales ilustran las condiciones que podrían presentarse en cacaotales. En cafetales cercanos a volcanes activos y que sufren de lluvias ácidas ocasionales se mantiene un dosel cerrado y compuesto por un selecto grupo de especies tolerante a la lluvia ácida (E. Somarriba, observaciones personales en El Crucero, Nicaragua). En sitios ventosos y nubosos, los árboles se plantan en arreglos lineales para controlar el viento, proveer sombra lateral y mantener plena exposición solar dentro de la plantación para reducir la incidencia de enfermedades (Somarriba *et al.* 2004).

4) Las plantas del dosel de sombra

Todas las plantas del dosel, útiles o no, interceptan parte de la radiación solar y proyectan sombra dentro de la plantación. En el dosel, la copa de cada planta se ubica a cierta altura sobre el suelo y posee características particulares de forma, tamaño, densidad (opacidad) y patrón fenológico (especialmente, la intensidad y cronología de la caducidad de las hojas) que determinan las características de la sombra que proyecta sobre los estratos inferiores del dosel. En su conjunto, las plantas del dosel, sus copas y atributos determinan la estratificación

vertical, la homogeneidad espacial de la cobertura de las copas en la plantación y la composición botánica, productiva y funcional del dosel.

- *Estratificación vertical.* La distribución de las copas en el perfil vertical del dosel tiene efectos sobre la cantidad y calidad de luz que recibe cada punto sobre el suelo. Los productores conocen que “las copas altas dan sombra rala mientras que las copas bajas dan sombra densa”. Y tienen razón. Si entre las 9 am y 3 pm de un día cualquiera observamos el recorrido sobre el suelo que hace la sombra de la copa de un árbol a 25 m de altura y lo comparamos con el recorrido que hace la sombra de la misma copa a 10 m de altura, veremos que el recorrido sobre el suelo de la sombra de la copa a mayor altura es más largo que el recorrido de la sombra de la copa a baja altura (Somarriba 2002). Es decir, las sombras de copas altas transitan más rápido sobre el suelo que las sombras de copas bajas. Una planta de cacao ubicada en el recorrido de la sombra de una copa alta recibirá menos horas sombra día⁻¹ que si estuviera ubicada en el recorrido de la sombra de una copa baja. Los términos “sombra rala” o “sombra densa” con que los productores etiquetan la sombra proyectada por copas altas o bajas realmente significan sombras “rápidas” y “lentas” y, desde el punto de vista de los cultivos en los estratos bajos del dosel, estos términos equivalen a “menos o más horas sombra día⁻¹”.

La distribución vertical de las copas en el dosel se analiza dividiendo el dosel en “capas” o “estratos” de altura y amplitud variables, según el sitio y las dimensiones de las plantas que se utilizan localmente. Por ejemplo, los cacaotales de indígenas de Talamanca, Costa Rica (10°N, altitud ≤300 m, >2500 mm año⁻¹, alta humedad relativa) cuentan típicamente con cuatro estratos verticales:

- *El piso de la plantación.* Entre 0-1 m de altura, contiene hierbas, palmas de porte bajo (p. ej., suita —*Geonoma congesta*—, una palma valiosa utilizada para forrar los techos de los ranchos) y plántulas de especies leñosas de mayor porte.
- *El estrato bajo.* Entre 2-8 m de altura, contiene las plantas de cacao, plátanos y bananos, frutales de porte bajo y latizales y fustales de árboles.
- *El estrato medio.* Entre 9-25 m de altura, contiene árboles de guaba chilillo (*Inga edulis*), naranjas (*Citrus* spp.) y otros cítricos, mamón chino (*Nephelium lappaceum*), pejibayes (*Bactris gasipaes*), cola de pava (*Cupania cinerea*), cocos (*Cocos nucifera*) y otras especies de frutales.

○ *El estrato alto*. Entre 26-40 m de altura, contiene árboles dispersos y en bajas densidades de laurel (*Cordia alliodora*), guácimo colorado (*Luehea seemanii*), sangrillo (*Pterocarpus officinalis*), almenadro (*Dypterix panamensis*), jabillo (*Hura crepitans*) y otras especies (Somarriba y Harvey 2003).

- *Distribución horizontal*. Los productores tratan de distribuir la cobertura de las copas lo más homogéneamente posible en la plantación y asegurar que todas las plantas de cacao reciban condiciones agroecológicas similares para crecer y producir. Los productores homogenizan la distribución espacial de la cobertura plantando o dejando crecer árboles de la regeneración natural en sitios de la plantación donde el dosel tiene “huecos” sin plantas y eliminando (cortando, anillando o quemando) árboles en los “parches” con alta densidad y sombra excesiva. La homogeneidad de la distribución horizontal se evalúa haciendo un croquis de la plantación, dividiéndola en una retícula de 10 x 10 m y anotando el porcentaje cubierto por las copas en cada celda. La retícula de 10 m de lado es lo suficientemente grande como para acomodar la mayoría de las especies arbóreas comúnmente encontradas en los cacaotales y, al mismo tiempo, lo suficientemente pequeña como para aplicarse en minifundios y pequeñas plantaciones ($\leq 0,5$ ha).

- *Composición botánica*. Los ecólogos y forestales han desarrollado numerosas metodologías para el inventario y análisis de la vegetación (Greig-Smith 1983) que son aplicables en el análisis florístico y estructural del dosel de los cacaotales. El análisis puede hacerse mediante censo (en plantaciones pequeñas) o inventario (utilizando parcelas de muestreo de 1000 m² —50 m x 20 m— ubicadas en sitios representativos de la plantación). En cada caso, los inventarios deben ofrecer la siguiente información sobre cada planta del dosel: nombre (familia, género, especie y nombre común), uso o beneficio indicado por el productor, dimensiones (diámetro del tallo y altura total) y atributos de la copa (altura, forma, dimensiones, opacidad y patrón fenológico y, especialmente, la intensidad y cronología de la caída de las hojas).

¿Cuáles especies, en qué densidades, en qué arreglos de siembra y con qué manejo deben introducirse en el dosel para lograr en forma óptima los objetivos del productor?

Una vez conocidos la composición botánica, los usos de las especies y el nivel de sombra que debe aportar

el dosel, ¿cuáles intervenciones hay que realizar en la plantación para lograr de forma óptima los objetivos del productor? Se propone que el diseño óptimo del dosel es la búsqueda del equilibrio entre la producción del cacao y la producción de los otros bienes y servicios de interés del productor y, por lo tanto, el diseño dependerá de muchos otros factores, tales como los precios y costos de producción del cacao y de los demás productos y servicios del cacaotal.

Las intervenciones son fáciles de visualizar. Por ejemplo, habiendo determinado que se puede aumentar en 10% la cobertura de copas de la plantación y que las especies del dosel actual no satisfacen adecuadamente sus objetivos de producción de madera, el productor plantará o escogerá de la regeneración natural los árboles maderables que cubran el 10% de cobertura faltante. Al enriquecer su dosel con maderables, el productor puede eliminar algunas plantas de especies sin valor para abrir espacio y aumentar la población de árboles útiles. Por ejemplo, en cacaotales adultos de indígenas Ngöbe de Changuinola, Panamá, se han introducido varias especies maderables (*Terminalia ivorensis*, *Tabebuia rosea*, *C. alliodora*) y se han eliminado varias especies de poco valor comercial y ecológico, con buenos resultados biofísicos y de adopción (Matos *et al.* 2000). La capacidad de producción maderable de *C. alliodora*, *C. megalantha* y *Swietenia macrophylla* en varios tipos de cacaotales ha sido estudiada profusamente en Costa Rica, Honduras y Brasil (Somarriba y Beer 1987, 1999, Calvo y Meléndez 1999, Melo 1999, Méndez 1999, Neto *et al.* 1999, Matos *et al.* 2000, Ramírez *et al.* 2001, Somarriba *et al.* 2001, Sánchez *et al.* 2002, Suárez y Somarriba 2002).

Las intervenciones son muy variadas, pero con la metodología descrita en este artículo el productor, el especialista agroforestal y los agentes de extensión podrán definir objetivos, diagnosticar la plantación actual y diseñar las innovaciones que permitan satisfacer mejor los objetivos del productor. Queda por desarrollar más las herramientas de extensión que permitan llevar a los productores esta metodología de análisis y mejoramiento de doseles.

APLICACIONES Y RECOMENDACIONES

El cacao ha participado en el mercado mundial de materias primas por más de 100 años, período durante el cual ha sufrido grandes oscilaciones cíclicas de precios de frecuencia y duración variables, que han causado grandes pérdidas económicas a familias y gobiernos (Ruf y Schroth 2004). La diversificación productiva de

los cacaotales para tener ingresos alternativos cuando caen los precios del cacao ha sido una de las recomendaciones más comunes en las épocas de crisis; similares recomendaciones se han presentado durante las crisis del café (Godoy y Bennett 1989). La metodología de análisis y mejoramiento de doseles ayudará en la implementación de los nuevos ciclos de diversificación y, de aplicarse regularmente en el manejo de los cacaotales, puede mejorar sustancialmente la provisión de bienes y servicios al productor y a la sociedad.

No existen muchas iniciativas de investigación y desarrollo dedicadas específicamente al estudio científico y manejo tecnificado de los doseles de cacaotales, ni se ha dedicado suficiente esfuerzo a capacitar a las familias productoras en estas técnicas. Gobiernos, sector privado y donantes tienen en el manejo tecnificado del dosel de sombra una gran oportunidad para mejorar la competitividad y el bienestar de las familias productoras. Se deben desarrollar materiales educativos y de extensión que hagan llegar esta herramienta de análisis a los productores de cacao de todo el mundo.

Aunque esta metodología se elaboró para aplicaciones en cacaotales, es directamente aplicable en cafetales (*Coffea* spp.), cupuazú (*Theobroma grandiflorum*), té (*Camellia sinensis*), cardamomo (*Elletaria cardamomum*), yerba mate (*Illex paraguariensis*) y otros sistemas agroforestales multiestratos con pastos y cultivos anuales

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alpizar, L; Fassbender, HW; Heuvelodop, J; Fölster, H; Enríquez, G. 1986. Modelling agroforestry systems of cocoa (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. *Agroforestry Systems* 4(3):175-189.
- Alvim, PT. 1984. Flowering of cocoa. *Cocoa Grower's Bulletin* 35:23-31.
- Ampofo, ST; Bonaparte, EENA. 1981. Flushing, flowering and pod-setting of hybrid cocoa in a cocoa/shade/spacing/cultivar experiment. *International Cocoa Research Conference* (7). Proceedings. p. 103-108.
- Amoha, FM; Nuertey, BN; Baidoo-addo, K; Opong, FK; Osei-Bonsu, K; Asamoah, TEO. 1995. Underplanting oil palm with cocoa in Ghana. *Agroforestry Systems* 30:289-299.
- Arévalo, E; Zúñiga, LB; Arévalo, CE; Adriaola, J. 2004. Cacao: manejo integrado del cultivo y transferencia de tecnología en la Amazonía Peruana. Tarapoto, San Martín, PE, Instituto de Cultivos Tropicales. 184 p.
- Asare, R. 2004. Cocoa agroforests in West Africa: a look at activities on preferred trees in the farming systems. Horsholm, DK, Danish Centre for Forest Landscape and Planning (KVL). 77 p.
- Beer, JW. 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems* 5:3-13.
- _____; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37/38):80-87.
- Bentley, JW; Boa, E; Stonehouse, J. 2004. Neighbor trees: shade, intercropping and cacao in Ecuador. *Human Ecology* 32(2):241-269.
- Bonaparte, EN. 1967. Interspecific competition in a cocoa shade fertilizer experiment. *Tropical Agriculture* (Trinidad y Tobago) 44(1):13-19.
- Byrne, PN. 1972. Cacao shade spacing and fertilizing trial in Papua, Nueva Guinea. *International Cocoa Research Conference* (4, Trinidad y Tobago). p. 275-286.
- Cabala R, FP; de Miranda, ER; Santana, CJL. 1972. Interaction between shade and fertilizers in cacao, in Bahia. *International Cocoa Research Conference* (4, Trinidad y Tobago). p 181-189.
- Calvo, G; Meléndez, L. 1999. Pseudoestacas de laurel para el enriquecimiento de cacaotales. *Agroforestería en las Américas* 6 (22):25-27.
- Cunningham, RK. 1959. A cocoa shade and manurial experiment at the West African Cocoa Research Institute, Ghana. *Journal of Horticultural Science* 43(1):14-22.
- _____. 1963. What shade and fertilizers are needed for good cocoa production? *Cocoa Grower's Bulletin* 1:11-16.
- Compañía Nacional de Chocolates. 1988. Manual para el cultivo del cacao. Bogotá, CO. 140 p.
- Cook, OF. 1901. Shade in coffee culture. Washington, US, Department of Agriculture. 79 p. (Bulletin no. 25).
- Dakwa JT. 1976. The effects of shade and NPK fertilizers on the incidence of cocoa black pod disease in Ghana. *Ghana Journal of Agricultural Science* 9(3):179-184.
- DEVIDA-CICAD/OEA. 2004. Cacao: paquete tecnológico para el valle del río Apurimac – Ene. Lima, PE, Organización de Estados Americanos, CICAD. 111 p.
- Ekenade, O; Egbe, NE. 1990. An analytical assessment of agroforestry practices resulting from interplanting cocoa and kola on soil properties in south-wertern Nigeria. *Agriculture, Ecosystems and the Environment* 30:337-346.
- Enriquez, GA. 1985. Curso sobre el cultivo del cacao. Turrialba, CR, CATIE. 239 p. (Serie Materiales de Enseñanza no. 22).
- _____. 2004. Cacao orgánico: guía para productores ecuatorianos. Quito, EC, INIAP. 359 p.
- Fassbender, HW; Alpizar, L; Heuvelodop, J; Fölster, H; Enríquez, G. 1988. Modelling agroforestry systems of cocoa (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. III. Cycles of organic matter and nutrients. *Agroforestry Systems* 6 (1): 49-62.
- Fordham, R. 1972. The water relations of cacao. *International Cocoa Research Conference* (4, Trinidad y Tobago). p. 320-325.
- Godoy, R; Bennett, C. 1989. Diversification among coffee smallholders in the highlands of South Sumatra, Indonesia. *Human Ecology* 16:397-420.
- Gogoi, BN. 1977. A review of research on shade in tea. *Horticultural Abstracts* No. 10996, 47(11):927.
- Gramacho, ICP; Magno, AES; Mandarino, EP; Matos, A. 1992. Cultivo e beneficiamento do cacau na Bahia. Bahía, BR, CEPLAC. 124 p.

- Greig-Smith, P. 1983. Quantitative plant ecology. *In* Studies in Ecology. Berkeley, California, US, University of California Press. v. 9, 356 p.
- Hardy, F. 1962. La sombra del cacao en relación con la intercepción de la lluvia. *Turrialba* 2(2): 80-86.
- Heuvelodop, J; Fassbender, HW; Alpizar, L; Enríquez, G; Fölster, H. 1988. Modelling agroforestry systems of cocoa (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. II. Cacao and wood production, litter production and decomposition. *Agroforestry Systems* 6(1):37-48.
- Herzog, F. 1994. Multipurpose shade trees in coffee and cocoa plantations in Cote d'Ivoire. *Agroforestry Systems* 27:259-267.
- Hurd, RG; Cunningham, RK. 1961. The cocoa shade and manurial experiment at the West African Cocoa Research Institute 3. Physiological results. *Journal of Horticultural Science* 36(2):126-137.
- Imbach, AC; Fassbender, HW; Borel, R; Beer, J; Bonnemann, A. 1989. Modelling agroforestry systems of cocoa (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and leaching. *Agroforestry Systems* 8(3):267-287.
- Matos, EN; Beer, J; Somarriba, E; Gómez, M; Current, D. 2000. Validación, adopción inicial y difusión de tecnología agroforestal en cacaotales con indígenas Ngöbe, Panamá. *Agroforestería en las Américas* 7(26):7-9.
- Melo, ACG. 1999. Enriquecimiento de cacaotales con caoba. *Agroforestería en las Américas* 22:31.
- Mendes, FAT. 1999. Evaluación financiera de sistemas agroforestales con cacao en Brasil. *Agroforestería en las Américas* 22:31-32.
- Neto, PJ; Melo, ACG; Dos Santos, MM. 1999. Cacao bajo sombra de caoba en Pará, Brasil. *Agroforestería en las Américas* 22:32.
- Oladokun, MAO. 1990. Tree crop based agroforestry in Nigeria: a checklist of crops intercropped with cocoa. *Agroforestry Systems* 11:227-241.
- _____; Egbe, NE. 1990. Yields of cocoa/kola intercrops in Nigeria. *Agroforestry Systems* 10:153-160.
- Quesada, F; Somarriba, E; Vargas, E. 1987. Modelo para la simulación de patrones de sombra. Turrialba, CR, CATIE. 87 p. (Serie Técnica, Boletín Técnico no. 118).
- Ramadasan, K; Abdullah, I; Teoh, KC. 1978. Intercropping of coconuts with cocoa in Malaysia. *The Planter* 54(627):329-342.
- _____. 1963. What shade and fertilizers are needed for good cocoa production? *Cocoa Grower's Bulletin* 1:11-16.
- Ramírez, OA; Somarriba, E; Ludewigs, T; Ferreira, P. 2001. Financial returns, stability and risk of cacao-plantain-timber agroforestry systems in Central America. *Agroforestry Systems* 51:141-154.
- Rice, RA; Greenberg, R. 2000. Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio* 29:167-173.
- Ruf, F; Schroth, G. 2004. Chocolate forests and monoculture: a historical review of cocoa growing and its conflicting role in tropical deforestation and forest conservation. *In* Schroth, GA; Fonseca, G; Harvey, C; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AMN. eds. *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscape*. Washington, DC, US, Island press. p. 107-134.
- Sanchez, J; Dubón, A; Krigsvold, D. 2002. Uso de Rambután (*Nephelium lappaceum*) con Cedro (*Cedrela odorata*) y Laurel Negro (*Cordia megalantha*) como sombra permanente en el cultivo del cacao. *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture* 46:57-60.
- Shepherd, R; Gilbert, JR; Cowling, PG. 1977. Aspects of cocoa cultivation under coconut on two estates in peninsular Malaysia. *Planter (Kuala Lumpur)* 53:99-117.
- Smith, ES. 1981. The interrelationships between shade types and cocoa pest and disease problems in Papua, Nueva Guinea. *International Cocoa Research Conference (7)*. *Proceedings*. p. 37-43.
- Somarriba, E. 2002. ¿Cómo estimar visualmente la sombra en cafetales y cacaotales? *Agroforestería en las Américas* 9(35-36):86-94.
- _____; Beer, J. 1987. Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management* 18: 113-126.
- _____; Beer, J. 1999. Sistemas agroforestales con cacao en Costa Rica y Panamá. *Agroforestería en las Américas* 6(22):7-11.
- _____; Valdivieso, R; Vásquez, G; Galloway, G. 2001. Survival, growth, timber productivity and site index of *Cordia alliodora* in forestry and agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 51: 111-118.
- _____; Harvey, C. 2003. ¿Cómo integrar simultáneamente producción sostenible y conservación de biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas? *Agroforestería en las Américas* 10(37-38):12-17.
- _____; Harvey, C; Samper, M; Anthony, F; González, J; Staver, C; Rice, R. 2004. Biodiversity in neotropical *Coffea arabica* plantations. *In* Schroth, GA; Fonseca, G; Harvey, C; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AMN. eds. *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscape*. Washington, DC, US, Island press. p. 198-226.
- Suárez, A; Somarriba, E. 2002. Aprovechamiento sostenible de *Cordia alliodora* de regeneración natural en cacaotales y bananales indígenas de indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 9(35-36):50-54.
- Suatunce, P. 2002. Diversidad de escarabajos estercoleros en bosques y en cacaotales de diferente estructura y composición florística, Talamanca, Costa Rica. *Thesis Mag. Sci.* Turrialba, CR, CATIE. 122 p.
- Vernon, AJ. 1967. New development in cocoa shade studies in Ghana. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 18: 44-48.
- Wiley, RW. 1975. The use of shade in coffee, cocoa and tea. *Horticultural Abstracts* 45(12):791-798.

Reseñas

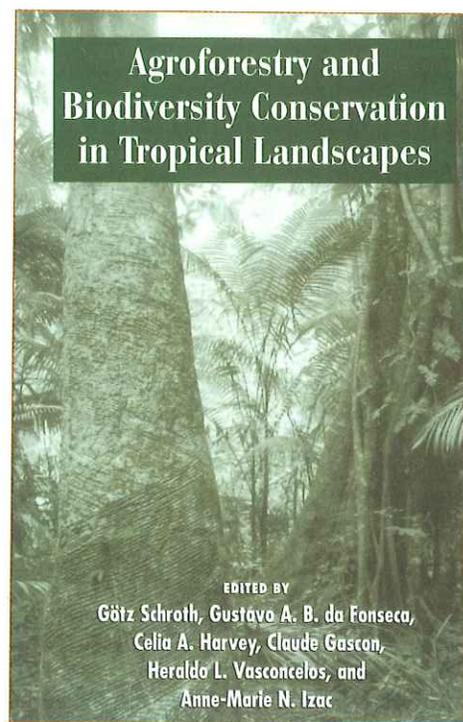
Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes (2004) Schroth, G; Fonseca, GAB; Harvey, CA; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AMN. Washington, DC, US, Island Press. 523 p.

Aunque en los últimos años se ha generado mucha información acerca de la importancia de los sistemas agroforestales para la conservación de la biodiversidad, los productores, investigadores y administradores de los recursos naturales no tienen una fuente de información completa y fácilmente utilizable, que guíe sus esfuerzos hacia la creación de paisajes agroforestales amigables con la conservación de biodiversidad.

El libro **Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes** intenta llenar este vacío al explorar los roles de las prácticas agroforestales en la conservación de la biodiversidad en paisajes dominados por el ser humano. Además, sintetiza el estado actual del conocimiento sobre el tema e identifica las lagunas que requieren investigación adicional. El libro consiste de 22 capítulos de 46 autores, basados en varias décadas de experiencia de campo en 13 países diferentes en los Trópicos de Centro y Sur América, África, Asia y Australia, y cubre un amplia gama de diferentes sistemas agroforestales.

Esta publicación explora tres hipótesis principales sobre las relaciones entre la agroforestería y la conservación de la biodiversidad: 1) los sistemas agroforestales pueden proveer hábitat y recursos para especies de plantas y animales parcialmente dependientes del bosque que no podrían sobrevivir en paisajes puramente agrícolas; 2) en agropaisajes que son mosaicos complejos de usos de tierra, el valor de la conservación de los remanentes de vegetación natural es mayor si están rodeados por un paisaje agroforestal que si la matriz circundante consiste de campos de cultivos y pastos carentes de cobertura arbórea; y 3) los sistemas agroforestales pueden ayudar a reducir la presión de deforestar tierra adicional para usos agrícolas si son adoptados como una alternativa para prácticas de usos de suelo más extensas y menos sostenibles.

El libro puede adquirirse a través de Island Press, 1718 Connecticut Avenue, N.W. Suite 300, Washington, D.C. 20009-1148, US. Tel: 202-232-7933. Fax: 202-234-1328. Correo electrónico: info@islandpress.org. También está disponible a través de <http://www.amazon.com>. Un número limitado de copias está disponible para la compra en la oficina de Celia Harvey, en la Sede Central del CATIE, Costa Rica.



Reseñas

Manual Árboles de Centroamérica

Ofrece la descripción de 199 especies nativas para agroforestería, plantaciones y manejo de bosque natural. Más de 1000 páginas de información botánica y forestal sobre usos y productos, mercadeo, silvicultura, ecología, distribución y taxonomía.

Árboles de Centroamérica incluye buscadores de nombres comunes, sinónimos botánicos y herramientas para seleccionar especies de acuerdo al tipo de bosque, uso o sistemas de manejo en finca más apropiados.

Toda la información del Manual la puede utilizar en forma electrónica (formato PDF) mediante un disco compacto que se le entrega junto con el libro.

Si está interesado en adquirirlo, lo puede obtener mediante los cursos de capacitación sobre el uso del Manual que se están desarrollando en todos los países de América Central, o bien descargándolo desde nuestra página web: www.arbolesdecentroamerica.info

Otra forma de obtenerlo es mediante la compra de cada ejemplar en la Sede del CATIE en Turrialba (US\$ 40) o en las Oficinas Técnicas del CATIE en los distintos países de Centroamérica (US\$ 50). Fuera de la región se le puede enviar a un costo de US\$60 desde la Sede del CATIE en Turrialba.

Para mayor información consulte a:

Celia López

Departamento de Agricultura y Agroforestería
CATIE 7170, Turrialba, Costa Rica
Tel. (506) 558 2350. Fax. (506) 558 2045. celial@catie.ac.cr

Guillermo Detlefsen

Departamento de Agricultura y Agroforestería
CATIE 7170, Turrialba, Costa Rica. Tel. (506) 558 2591.
gdetlef@catie.ac.cr

Jesús Cordero

Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, University of Oxford, South Parks Rd. OXFORD OX1 3RB, UK
Tel. +44 (0)1865 275130, Fax: +44 (0)1865 275074. jesus.cordero@plants.ox.ac.uk

El proyecto ha sido financiado por el Programa de Investigación Forestal (FRP) del Departamento para Desarrollo Internacional del Reino Unido (DFID) para el beneficio de países en vías de desarrollo. Las opiniones expresadas no coinciden necesariamente con las de DFID. Proyecto R7588 FRP

