

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

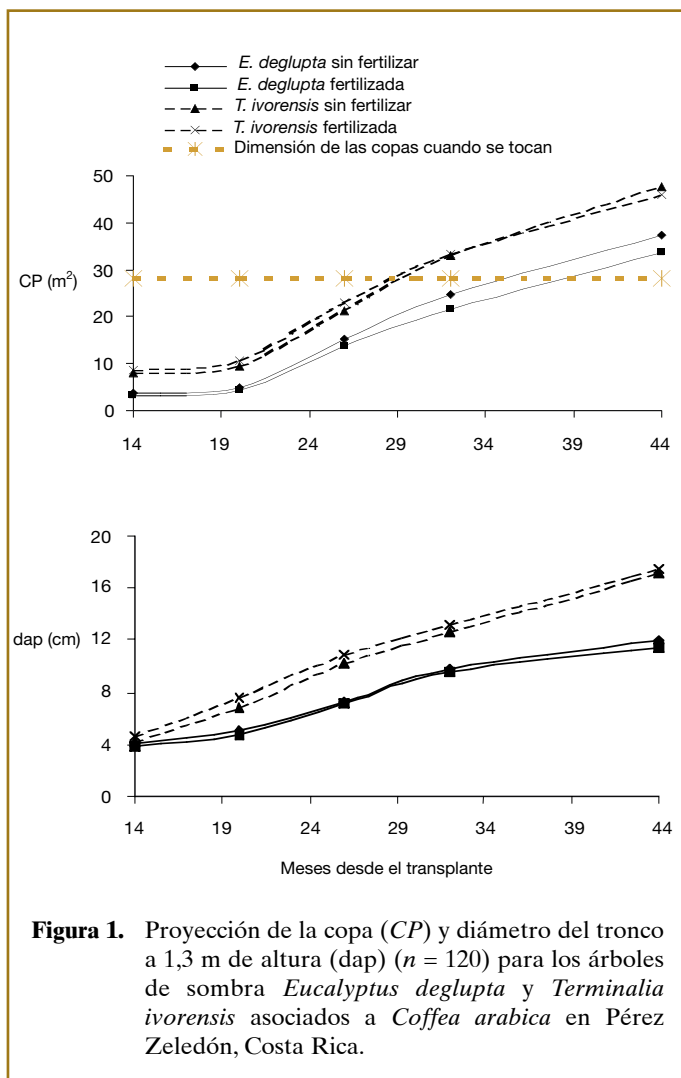
La proyección de la copa y el dap de *T. ivorensis* fueron mayores que los de *E. deglupta* ($p < 0,05$; Cuadro 2, Fig. 1) pero no hubo diferencia en la altura de árboles. Las copas de *T. ivorensis* y de *E. deglupta* se traslaparon a los 29 y 36 meses, lo que justifica un primer raleo antes de terminar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

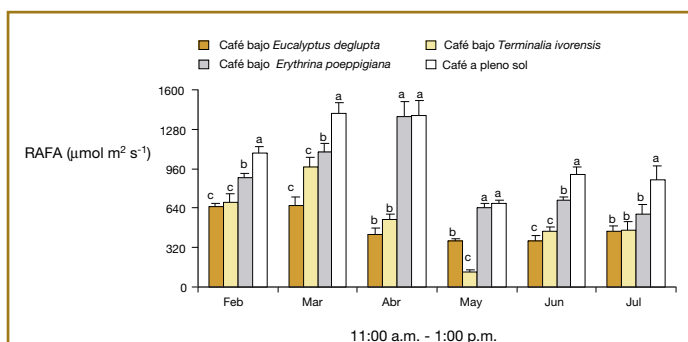


Figura 2. Radiación fotosintéticamente activa (RAFA) disponible para café (*Coffea arabica*) a pleno sol o bajo tres tipos de sombra, Costa Rica. Valores con la misma letra en el mismo mes no son significativamente diferentes (Student-Newman-Keuls: $p < 0,05$).

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.

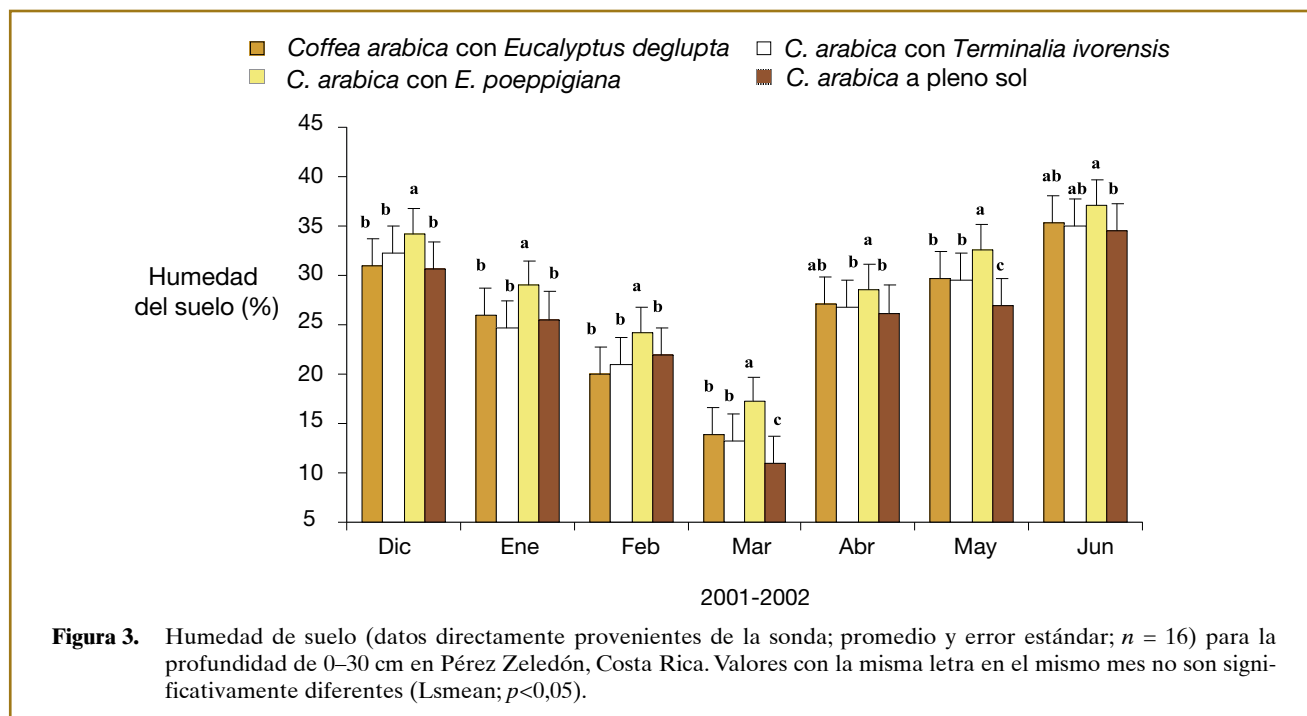
⁽³⁾ Promedio (error estándar; $n = 9$).

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).

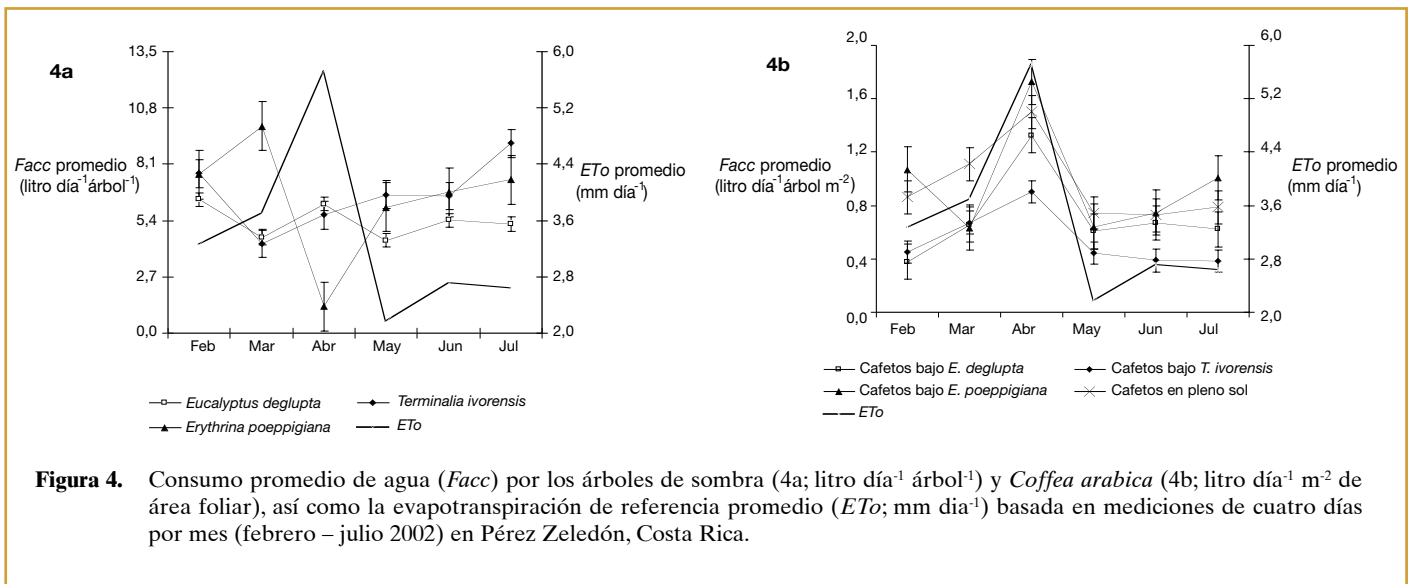
La disminución fuerte del nivel de sombra durante el período seco debida a la caída natural de hojas de los árboles de sombra provocó altos niveles de estrés hídrico, calor y radiación solar en los cafetos más protegidos por esos árboles durante el resto del año. En la época lluviosa, el consumo de agua 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 ($12,4 m^3 día^{-1} ha^{-1}$) ocurrió en junio (durante la época lluviosa) y el consumo máximo ($25,9 m^3 día^{-1} ha^{-1}$) 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 $m^3 día^{-1} ha^{-1}$ 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; Kozłowski, 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.