

INTERCEPTACIÓN DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA Y SU RELACIÓN CON EL ÁREA FOLIAR DE *Coffea arabica*

Esperanza Castillo-Rodríguez*, Jaime Arcila-Pulgarín**, Alvaro Jaramillo-Robledo**, Joaquín Sanabria***

RESUMEN

CASTILLO R., E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA J. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica*. Cenicafé 48(3): 182-194. 1997.

Se estudiaron los patrones de interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y su relación con el desarrollo foliar en *Coffea arabica* L. var. Colombia de 36 meses de edad en la Estación Central Naranjal de CENICAFÉ en Chinchiná, Colombia. Se utilizaron cinco densidades de siembra, de 2.500, 5.000, 7.500, 10.000 y 12.500 plantas por hectárea, y dos disposiciones de las plantas en el terreno en cuadro y en rectángulo. Se evaluó el área foliar (AF), el índice de área foliar (IAF), y la interceptación de la RFA y se aplicaron dos modelos para determinar los coeficientes de extinción de la RFA. La disposición de las plantas no afectó significativamente el AF y el IAF. El área foliar por planta disminuyó con el incremento en la densidad, en tanto que el IAF y la interceptación se incrementaron mostrando una respuesta cuadrática; el IAF máximo fue de 6,1, alcanzado con 12500 plantas.ha⁻¹ y la interceptación máxima de 97%, en 10000 plantas.ha⁻¹. La interceptación de la RFA en la planta individual no se afectó por la densidad ni con la disposición; el estrato superior interceptó un 70% de la RFA disponible. Se determinaron los coeficientes de extinción mediante los modelos de Monsi y Saeki y de Jackson y Palmer; los valores de k variaron en un rango de 0,41 a 0,60 bajo condiciones de RFA difusa y de 0,51 a 0,72 para la RFA directa.

Palabras claves: Café, fotosíntesis, densidades de siembra, índice de área foliar, área foliar, radiación.

ABSTRACT

The patterns for photosynthetic active radiation (PAR) interception and its relationship with the foliar development were studied on 36 month old populations of *Coffea arabica* L. var. Colombia, at the Central Experiment Station Naranjal of CENICAFÉ, in Chinchiná Colombia. The populations were obtained through planting densities of 2500, 5000, 7500, 10000 and 12500 plants.ha⁻¹ and two arrangements, square and rectangle. The variables evaluated were Leaf Area (LA) Leaf Area Index (LAI) and Photosynthetic Active Radiation (PAR) interception. Two interception models were used to determine the extinction coefficients in the five planting densities. The type of arrangement did not significantly affected LA and LAI. LA per plant decreased with increasing planting density; in contrast, LAI and PAR interception increased showing a quadratic behavior. The maximum LAI was 6.1 reached at about 12500 pl.ha⁻¹ and the maximum interception was 97% at 10000 pl.ha⁻¹. PAR interception through the plant profile did not change with density or arrangement. The top stratum intercepted about 70% of available PAR. The extinction coefficients (k) determined with the Monsi Saeki's model for closed canopy and the Jackson and Palmer's model for the open canopy showed a good fit. K values ranged between 0.41 and 0.60 under the condition of diffuse PAR and between 0.51 and 0.72 for direct PAR.

Keywords: Coffee, photosynthesis, planting density, leaf area index, leaf area, radiation

¹ Fragmento del trabajo "Interceptación de la radiación solar en cafetales" presentado a la Universidad Nacional de Colombia como requisito para optar al título de Magister en Fitotecnia. Santafé de Bogotá.

* Estudiante de Maestría en Fitotecnia.

** Investigador Principal I e Investigador Científico II. Fisiología y Agroclimatología, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

*** Estadístico. CORPOICA, Santafé de Bogotá

La radiación solar es la energía directriz de la fotosíntesis y, por tanto, ejerce un efecto preponderante sobre la productividad y el uso del agua en los cultivos. Por su parte, el desarrollo foliar, entre otras características del follaje, es uno de los factores más importantes en la interceptación de la radiación, pues el área foliar como principal tejido fotosintético determina la fracción de energía solar que puede ser captada y convertida en materiales orgánicos (13).

Squire (17), establece que el primer paso en los estudios de productividad consiste en determinar cuánta producción depende de la radiación incidente y cuánta de la eficiencia con la cual el cultivo usa la radiación para producir materia seca. Esta eficiencia depende de una serie de factores gobernados por los atributos fisiológicos de la planta, que pueden ser divididos en dos grupos: los que determinan la fracción de energía interceptada y absorbida por el follaje, como son sus dimensiones, configuración y longevidad y aquellos que determinan las tasas de fotosíntesis y respiración, y por tanto, la tasa de producción de materia seca por unidad de follaje.

Una interceptación eficiente de la radiación incidente también depende del grado de cobertura del terreno por parte del follaje; el mejor indicativo de esta cobertura lo constituye el índice de área foliar (IAF), el cual es una medida que se deriva del conocimiento del desarrollo foliar y expresa la relación entre el área foliar y el área de suelo que ocupa (m^2 de follaje/ m^2 de terreno) (21). Por consiguiente, el conocimiento de la interacción entre el índice de área foliar y el ambiente de radiación constituye una herramienta valiosa en la modelación de la fotosíntesis en el cultivo y de la productividad.

Desde el punto de vista práctico, los estudios de interceptación de luz y su relación con el desarrollo foliar proporcionan la base científ-

fica de algunos aspectos para el manejo de los cultivos, como son la elección de la densidad de siembra, disposición de las plantas en el terreno, tamaño y forma del árbol y el tipo y momento de las podas, entre otros.

Los estudios de interceptación han sido adelantados principalmente mediante modelos, dada la multiplicidad de factores involucrados; según Ross (14), éstos consideran la cantidad de follaje, dimensiones y orientación del follaje, distribución del área foliar, ángulos foliares y la radiación solar total, incluyendo los componentes directo y difuso. El desarrollo de un modelo que incorpore todos estos aspectos resulta extremadamente complicado; de allí que los modelos logrados hasta ahora deben asumir simplificaciones.

Dos modelos de radiación que por ser simples son de frecuente uso y que tratan de describir el comportamiento de la luz a través del follaje son el de Monsi y Saeki, citado por Saeki (15) para la planta individual o para follajes densos y el de Jackson y Palmer (8) desarrollado para follajes discontinuos. Estos modelos se basan en la ley de Beer citado por Jones (10) y establecen que la radiación solar que penetra en la parte aérea de la planta disminuye exponencialmente con el índice de área foliar acumulado y la interceptación total es, consecuentemente, una función exponencial de éste.

En café las investigaciones sobre interceptación de la radiación solar son limitadas; Trojer (18) en Colombia estudió la distribución de la radiación en cafetales bajo sombrío; Kumar (12) en Kenia realizó mediciones de interceptación de radiación fotosintéticamente activa en plantaciones con altas densidades de siembra; por su parte Jaramillo (9) en Brasil y en Colombia, estudió los componentes de los balances de radiación y de energía en la planta y en el cultivo en las variedades Catuai, Borbón amarillo y Caturra, utilizando en su estudio el modelo de Monsi y Saeki.

El presente trabajo tuvo como propósito caracterizar y analizar los patrones de interceptación y distribución de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el desarrollo foliar en *Coffea arabica* L. var. Colombia, en varias densidades de siembra y dos tipos de disposición de las plantas en el campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se realizó en la Estación Experimental de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná Caldas, ubicada por las coordenadas 04E 59' Latitud Norte y 75E 39' Longitud Oeste, con una altura de 1400 m.s.m.n., precipitación promedio anual de 2700 mm, temperatura media de 20,6°C y brillo solar de 1800 horas/año (7).

Parcela experimental. El estudio se realizó en un cultivo de *Coffea arabica* L. var. Colombia de tres años y medio de edad, establecido por la disciplina de Fitotecnia de CENICAFÉ (6). El ensayo constaba de 10 tratamientos correspondientes a la combinación de cinco densidades de siembra y dos disposiciones de las plantas en el terreno, distribuidos bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial y cuatro repeticiones.

Se utilizaron como densidades de siembra 2500, 5000, 7500, 10000 y 12500 plantas.ha⁻¹ y las disposiciones estuvieron determinadas por las relaciones entre el largo y el ancho del rectángulo de siembra 1:1 (cuadrado) y 2:1 (rectángulo). La unidad experimental estuvo conformada por tres plantas al azar de cada tratamiento y en cada repetición.

Evaluaciones. Cada planta se dividió en cuatro estratos obtenidos por división del número total de nudos del tallo principal en cuatro partes. Durante los meses de julio y agosto de 1993 se realizaron mediciones de desarrollo foliar, así

como registros de radiación fotosintéticamente activa.

Desarrollo foliar. A cada planta de la unidad experimental se le registró su altura, número de hojas y área foliar por estrato. El área foliar se determinó multiplicando el número total de hojas de la planta en cada estrato por el área promedio por hoja, según la metodología establecida por Arcila (2). Para tal fin se llevó a cabo un submuestreo en dos ramas por estrato, representativas a lo largo del tallo, midiendo el área foliar mediante una regla graduada que relaciona el largo de la hoja con su área (2,19).

A partir de las mediciones de área foliar se obtuvo el índice de área foliar (IAF), el cual se define como el cociente entre el área foliar y el área de terreno destinado a cada planta según la disposición y la distancia de siembra.

Medidas de radiación. La radiación fotosintéticamente activa (RFA) se midió de las 9:00 a las 16:00 horas, bajo condiciones de cielo despejado (radiación directa) y de cielo nublado (radiación difusa) durante el período comprendido entre el 26 de julio y el 20 de agosto de 1993. Los registros se efectuaron mediante un ceptómetro (Sunfleck ceptometer type CEP, Delta-T Devices Ltd, England) (5) que mide e integra la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos (con longitudes de onda entre 400 y 700nm) en una longitud de 80 cm y los registra en mol.m⁻² S⁻¹.

En cada planta seleccionada se tomaron registros de RFA incidente y reflejada en la parte superior del dosel, transmitida en cada uno de los estratos establecidos y transmitida a través de las hojas translapadas de cada planta de la unidad experimental y sus vecinas (Figura 1).

La radiación fotosintéticamente activa interceptada se calculó como el porcentaje de RFA transmitida en cada estrato de la planta,

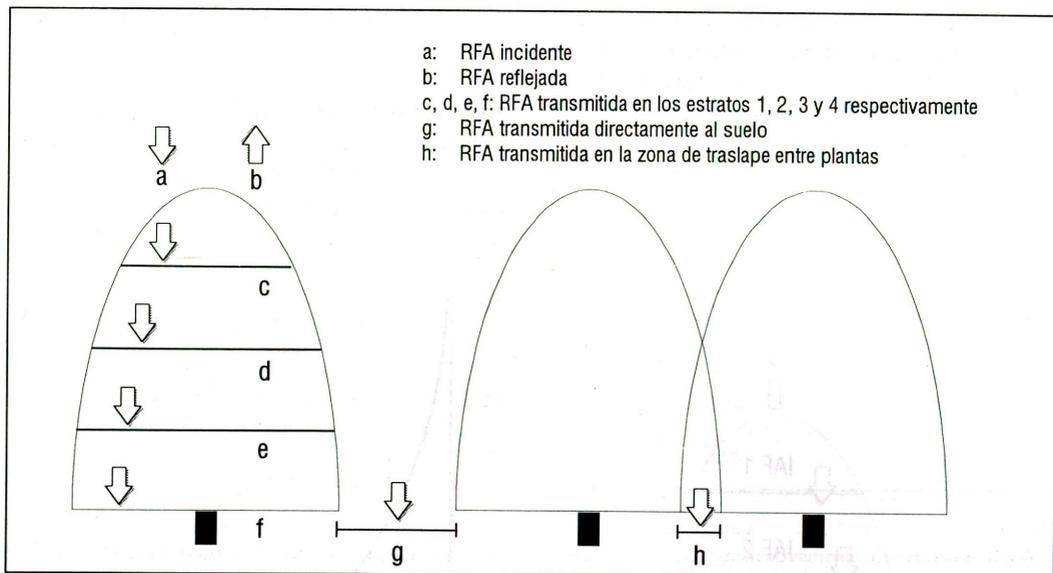


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo de la radiación fotosintéticamente activa (RFA).

con relación a la RFA disponible neta en la parte superior del follaje (RFA incidente - RFA reflejada).

Análisis de la información. Efecto de los tratamientos. Se efectuaron análisis de varianza para establecer el efecto de los tratamientos sobre el área foliar, índice de área foliar e interceptación de la RFA; igualmente, para estas variables se establecieron funciones de regresión con el fin de determinar su comportamiento según la disposición y la densidad.

Modelos de radiación. Los modelos de Monsi y Saeki citado por Saeki (15) y de Jackson y Palmer (8) fueron aplicados para estimar el coeficiente de extinción (k) de la RFA en los diferentes tratamientos. El primero se aplicó en las poblaciones con follaje cerrado, Figura 2, mediante el desarrollo de la siguiente expresión:

$$\ln (I/I_0) = -k \cdot IAF \quad \langle\langle 1 \rangle\rangle$$

en donde:

I = Flujo de radiación fotosintéticamente activa (RFA) que alcanza la superficie en la parte inferior de cada estrato establecido de la planta.

I_0 = Diferencia entre la RFA incidente y la reflejada en la parte superior del dosel.

k = Coeficiente de extinción

IAF = Índice de área foliar

En el modelo de Jackson y Palmer (8), aplicado a las poblaciones cuyo follaje aún no había cerrado (Figura 3), se utilizaron los registros de RFA transmitida a través del follaje (T_c) y de la RFA que pasa directamente al suelo (T_f), y se desarrolló la siguiente ecuación:

$$T = T_f + (1 - T_f) e^{-k IAF} \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

en donde:

T = Transmisividad total

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo foliar e interceptación según la densidad. En la Tabla 1 se presentan los promedios de los valores de área foliar por planta, índice de área foliar (IAF) y transmisividad e

- T_r = Flujo de RFA transmitida directamente al suelo, entre los árboles
 $1-T_r$ = Radiación transmitida a través del follaje = T_c
 IAF = Índice de área foliar
 $(IAF)^* = IAF / (1-T_r)$ = Índice de área foliar efectivo

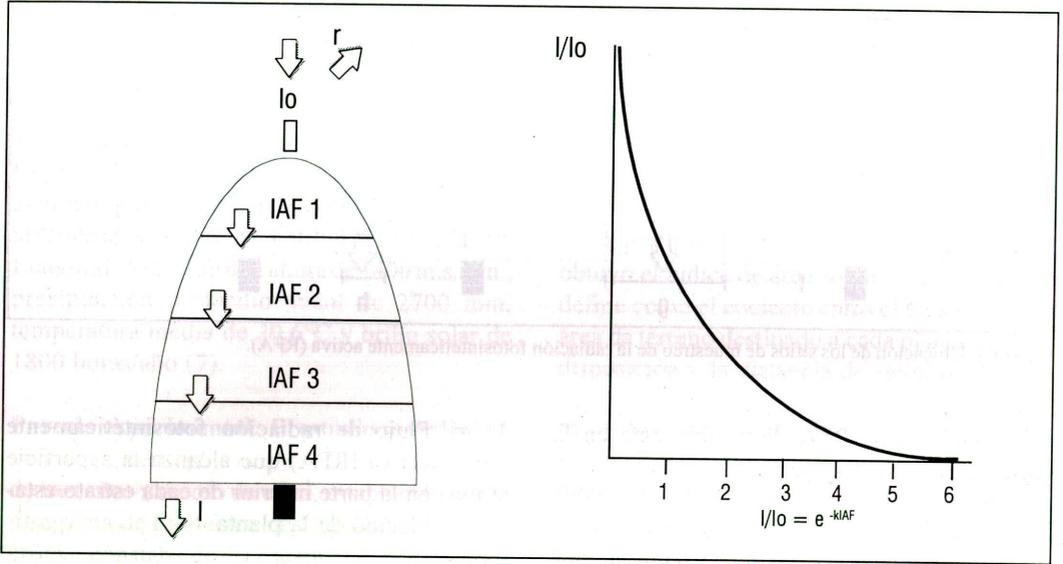


Figura 2. Representación y componentes del modelo de Monsi y Saeki, 1953 (15).

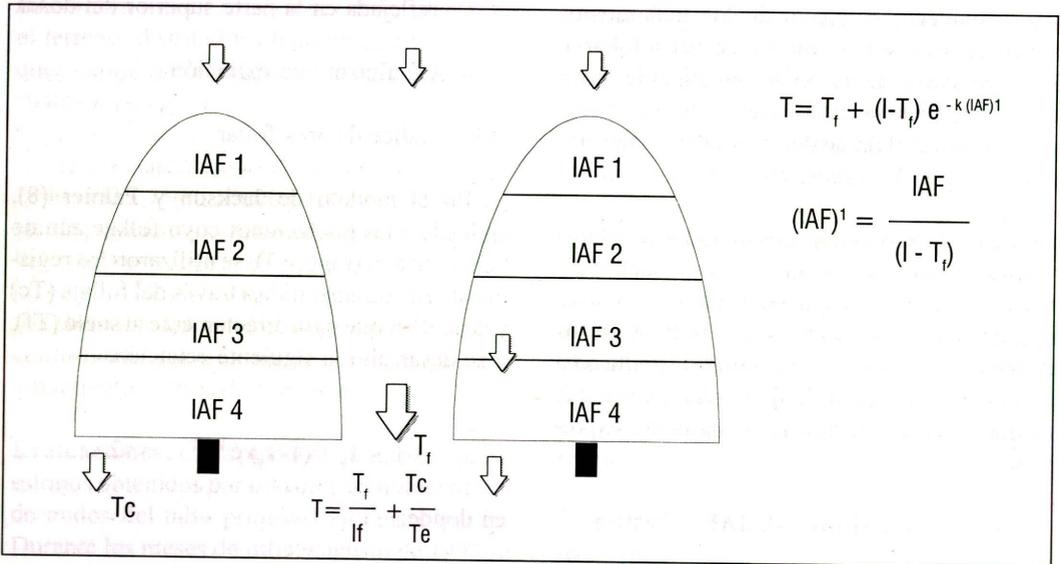


Figura 3. Representación y componentes del modelo de Jackson y Palmer (8).

TABLA 1. Área foliar (AF), Índice de Área Foliar (IAF), Intercepción (I) y Transmisividad (T) de la radiación fotosintéticamente activa en poblaciones de *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses), Naranjal - Cenicafé, 1993.

DENSIDAD (Plantas.ha ⁻¹)	AF (m ² .pl. ⁻¹)	IAF m ² .m ⁻²	T*. (%)	I*. (%)
2.500	12,98a**	3,3a	34,2a	65,8a
5.000	10,17b	5,1b	13,1b	86,9b
7.500	6,89c	5,2b	6,5c	93,5c
10.000	5,55cd	5,6bc	3,1c	96,9c
12.500	4,94d	6,3c	3,0c	97,0c

* Promedio de evaluaciones a nivel del suelo (bajo el árbol, traslape y calle)

** Promedios dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P<0,05).

intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en las cinco densidades objeto de estudio.

La disposición de las plantas en el terreno en cuadro o en rectángulo no ejerció efectos significativos sobre las variables AF e IAF, por tal razón solo se presentan los valores promedios. Por su parte la intercepción se vio afectada por la interacción densidad - disposición (Tabla 2).

El comportamiento del área foliar y del IAF en función de la densidad de siembra se presenta en la Figura 4. El área foliar por planta disminuyó presentando una respuesta cuadrática al aumento en la densidad, en tanto que el IAF incrementó, también en forma cuadrática para esta edad del cultivo (36 meses); las derivadas de las respectivas ecuaciones de regresión permitieron obtener un IAF máximo de 6,1 en las 12500 plantas.ha⁻¹, y un área foliar mínima por planta de 3,66 m² que se presentaría con una densidad de 13.824 plantas.ha⁻¹.

La disminución del área foliar por planta con el incremento en la densidad ha sido regis-

trada en otras investigaciones (1, 3, 19) y está relacionada con el incremento en la competencia dentro y entre plantas, principalmente por espacio y luz, a medida que el número de plantas por unidad de área es mayor; como lo muestra la Tabla 1, donde se observa que a partir de las 7500 plantas.ha⁻¹ se intercepta más del 90% de la RFA.

Los trabajos realizados por diferentes autores establecen que el café puede alcanzar mayores valores de IAF que los encontrados en el presente estudio. Valencia (19) registra para la variedad Caturra un IAF óptimo de 8, el cual se logra a los tres años con una densidad de 10000 plantas.ha⁻¹; por su parte Arcila y Chaves (4) obtuvieron para la variedad Colombia un valor máximo de 9,8 en la densidad de 5000 plantas.ha⁻¹, aunque este valor es muy cercano al alcanzado con 10000 plantas.ha⁻¹ y el cual fue de 9,1.

El efecto de la disposición de las plantas en el terreno sobre la intercepción se presentó únicamente en 2500 plantas.ha⁻¹, en donde la población con plantas dispuestas en rectángulo

TABLA 2. Análisis de varianza para el Área Foliar (AF), Índice de Área Foliar (IAF) e Interceptación (I) de radiación en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses). Naranjal - Cenicafé. 1993.

CUADRADOS MEDIOS				
F. de V.	G.L.	AF	IAF	I
BLOQUES	3	3,846 ns	0.601 ns	22,180 ns
DENSIDAD	4	92,146 **	9,901 **	1370,750**
DISPOSICIÓN	1	0,090 ns	0,010 ns	4,050 ns
DENSIDAD X DISPOSICIÓN	4	1,250 ns	0,186 ns	81,831 **
ERROR	27	3,107	0,966	14,971
PROMEDIO		8,104	5,101	88,032
C.V.		21,752	19,270	4,395

* P<0,05
 ** P<0,01
 ns: No significativo

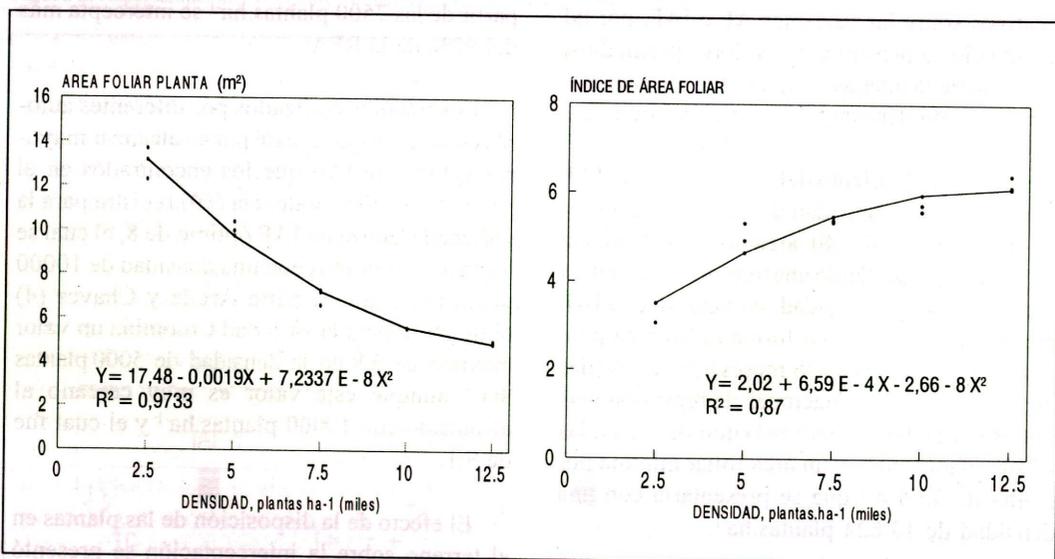


Figura 4. Área foliar e índice de área foliar por planta en función de la densidad de siembra en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses). Estación Central Naranjal - Cenicafé. 1993.

interceptó un porcentaje de RFA significativamente mayor que aquella con disposición en cuadrado (Figura 5); sin embargo, desde el punto de vista de manejo del cultivo esta densidad en cualquiera de las dos disposiciones, no sería recomendable por la baja utilización del terreno evidenciado, en los bajos valores de IAF (3,1 y 3,3); además de la alta proporción de pérdida de RFA (alrededor del 30%). En las demás densidades se pierde el efecto de la disposición, debido al cierre progresivo del follaje. En las dos disposiciones la interceptación incrementó en respuesta al aumento en la densidad hasta lograr un máximo de 97% hacia las 10000 plantas.ha⁻¹.

Distribución de la RFA a través del follaje.

La Tabla 3 presenta los valores promedio de área foliar, transmisividad e interceptación de la RFA según el estrato en el perfil de la planta. No se presentaron diferencias significativas por efecto de la disposición. La mayor proporción de RFA fue interceptada en el estrato 1 (superior) de las plantas en todas las densidades, con valores en el rango del 69% al 77%; en este estrato el área foliar no presentó una variación

marcada en las diferentes densidades. En contraste, en los dos estratos inferiores ésta disminuyó significativamente en las densidades altas, lo cual se relaciona con la baja disponibilidad de radiación dentro del follaje.

El estrato 2 de todas las densidades interceptó el menor porcentaje de RFA, hecho asociado a la escasez de follaje debido a que la zona de producción de frutos se localiza principalmente en este estrato; la pequeña proporción de área foliar en este sitio se debe posiblemente a la defoliación causada por la maduración del follaje, inclinación del follaje por presencia de frutos o competencia entre frutos y hojas. Cabe anotar que la época de muestreo coincidió con el llenado de frutos.

La RFA transmitida a la superficie del suelo no varió significativamente a través de las densidades y presentó un promedio de 3%; en consecuencia, la interceptación promedio por planta en todas las poblaciones fue de 97%. Jaramillo (9) obtuvo resultados similares para las variedades Catuai y Borbón amarillo, las cuales interceptaron 95% de la radiación fotosintéticamente activa; igualmente, encontró que la mayor proporción de la radiación fue interceptada en el primer estrato. El autor establece que en el árbol de café adulto se presenta una capa externa de hojas que retiene gran proporción de la radiación solar incidente, quedando una proporción mínima disponible para las hojas más internas de la planta.

Extinción de la RFA. Aplicación de los modelos de Monsi y Saeki y de Jackson y Palmer.

El modelo de Jackson y Palmer (8), diseñado para follajes discontinuos se aplicó en las poblaciones que presentaron esta característica (2500 y 5000 plantas.ha⁻¹); en las otras densidades, en las cuales la plantación se caracteriza por presentar un follaje cerrado, se les aplicó el modelo de Monsi y Saeki, (15). En los dos casos se establecieron modelos de regresión lineal entre el logaritmo natural de la transmisividad

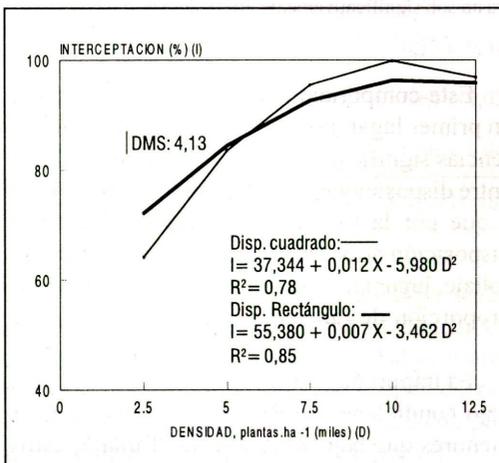


Figura 5. Interceptación de la radiación fotosintética activa en poblaciones de *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses) según la densidad, para dos disposiciones de siembra. Naranjal. Cenicafé. 1993.

TABLA 3. Área foliar (AF), Transmisividad (T) e Interceptación (I) de la radiación fotosintéticamente activa en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses), según el estrato en el perfil del follaje, bajo diferentes densidades de siembra. Naranjal - Cenicafé. 1993.

ESTRATO	DENSIDAD (Pl.ha ⁻¹)	AF m ²	T. (%)	I. (%)
1 (superior)	2500	1,26a**	29,6ab	70,4ab
	5000	1,27a	31,2a	68,8a
	7500	1,43ab	27,1ab	72,9ab
	10000	1,44ab	24,2ab	75,8ab
	12500	1,55b	22,8b	77,2b
2	2500	1,25a	26,8ab	73,2ab
	5000	1,11a	30,4a	69,6a
	7500	1,07a	21,4b	78,6b
	10000	1,11a	20,0bc	80,0bc
	12500	1,03a	13,4c	86,6c
3	2500	3,22a	16,5a	83,5a
	5000	2,35b	12,1ab	87,9ab
	7500	1,37c	10,5bc	89,5bc
	10000	1,01c	9,0bc	91,0bc
	12500	0,95c	5,0c	95,0c
4 (Inferior)	2500	7,28a	2,9a	97,1a
	5000	5,41b	3,0a	97,0a
	7500	3,18c	2,a	97,2a
	10000	2,05d	2,1a	97,9a
	12500	1,40d	2,0a	98,0a

* Valores acumulados a través de los estratos

** Promedios dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P<0,05).

a través del follaje, en función del IAF acumulado en cada uno de los cuatro estratos establecidos de la planta, con el fin de determinar los coeficientes de extinción (k); los valores de k corresponden a la pendiente de la regresión.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en los diferentes tratamientos; los valores de k varían en un rango de 0,51 a 0,72 para la RFA directa y de 0,41 a 0,60 para la RFA difusa. La prueba de comparación de pendientes permitió establecer que no existen diferencias significativas (P<0,05) entre los coeficientes de extinción de las dos disposiciones en cada densidad, tanto para radiación directa como para difusa.

Este comportamiento puede ser explicado, en primer lugar, porque no se presentaron diferencias significativas en el índice de área foliar entre disposiciones y, en segundo lugar, debido a que por la forma semicónica del cafeto la disposición no afecta los estratos superiores del follaje, lugar en donde es interceptada la mayor proporción de radiación.

Es importante destacar que los valores de k bajo condiciones de RFA difusa tienden a ser menores que bajo RFA directa, Tabla 5; estos resultados indican que hay una mayor disponibilidad de este tipo de radiación a través del follaje. Lakso y Musselman (11), trabajando con manzano encontraron mayores porcentajes

TABLA 4. Coeficientes de extinción (k) de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses), bajo diferentes densidades de siembra. Naranjal - Cenicafé. 1993

DENSIDAD (Plantas.ha ⁻¹)	Coeficientes de extinción (k)		
	R1 (Directa)	R2 (Difusa)	TOTAL
2500	0,51 ± 0,03a*	0,41 ± 0,02a	0,46 ± 0,02a
5000	0,56 ± 0,07ab	0,47 ± 0,02b	0,48 ± 0,02a
7500	0,72 ± 0,08b	0,57 ± 0,04c	0,60 ± 0,04b
10000	0,63 ± 0,13b	0,60 ± 0,03c	0,60 ± 0,03b
12500	0,61 ± 0,04bc	0,60 ± 0,04c	0,61 ± 0,03b

R1: Radiación directa

R2: Radiación difusa

* Valores de k seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P<0,05).

TABLA 5. Coeficientes de extinción (k) de la radiación fotosintéticamente activa difusa en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses), bajo diferentes densidades de siembra. Naranjal - Cenicafé. 1993.

DENSIDAD (Plantas.ha ⁻¹)	IAF	k	R2	C.V.
2500	3,3	0,41 ± 0,02 a*	0,87	16,3
5000	5,1	0,47 ± 0,02 b	0,78	20,2
7500	5,3	0,57 ± 0,04 c	0,84	18,3
10000	5,7	0,60 ± 0,03 c	0,85	19,3
12500	6,3	0,60 ± 0,04 c	0,88	18,7

* Valores de k dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P<0,05).

de RFA en el interior del dosel bajo cielo cubierto que bajo cielo despejado y concluyeron que en condiciones de nubosidad se transmiten y reflejan suficientes cantidades de radiación, produciendo altos niveles del componente difuso en el interior de los árboles.

Con el fin de establecer el comportamiento de los coeficientes de extinción en función de la densidad de siembra, se probaron diferentes

modelos de regresión para cada una de las condiciones estudiadas; solamente se logró modelar con buen ajuste el comportamiento de k para la RFA difusa, Figura 6.

La variación de k se ajustó mediante un modelo exponencial de segundo orden que muestra un incremento marcado hasta la densidad de 7500 plantas.ha⁻¹, y tiende a estabilizarse en las densidades superiores. Este comporta-

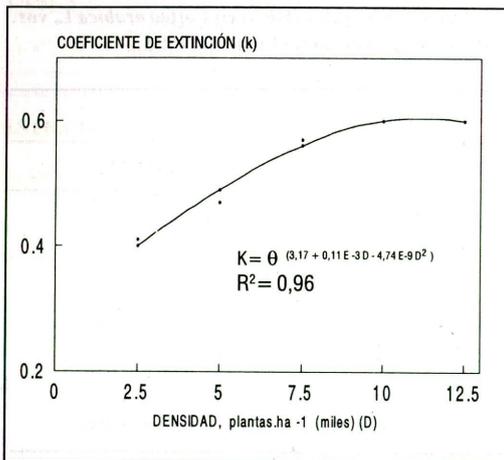


Figura 6. Coeficiente de extinción (k) para RFA bajo condiciones de luz difusa, en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses), según la densidad de siembra. Naranjal - Cenicafé. 1993.

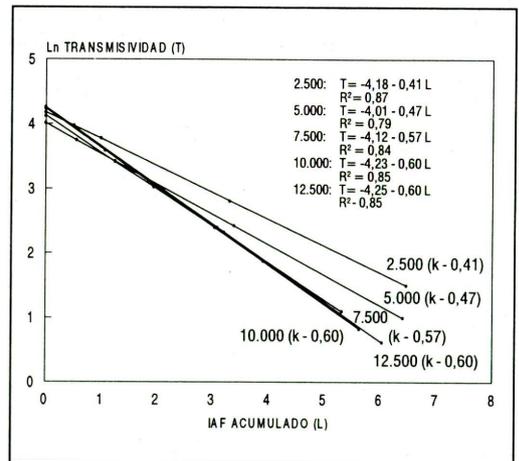


Figura 7. Coeficiente de extinción para la radiación fotosintéticamente activa difusa, en *Coffea arabica* L. var. Colombia (36 meses) bajo diferentes densidades. Naranjal - Cenicafé. 1993.

miento se explica porque un IAF más grande implica mayor cantidad de follaje que intercepta radiación y, por consiguiente, una mayor tasa de absorción de energía.

Van Kraalingen *et al.* (20) establecieron a través de modelos un comportamiento similar para el componente difuso de la RFA en palma africana; los valores de k mostraron un incremento paulatino con el aumento del IAF en el rango de 2 a 6 y disminuyeron cuando el IAF fue mayor de 8.

Se considera que, por presentar un mejor ajuste, los coeficientes de extinción bajo condiciones de RFA difusa deben ser tenidos en cuenta para la modelación matemática del cultivo; La Tabla 5 y la Figura 7 resumen su comportamiento a través de las densidades estudiadas. Los valores de k incrementan con la densidad hasta 7500 plantas.ha⁻¹, variando significativamente ($P < 0,05$) en un rango de 0,41 a 0,57. De esta densidad en adelante no se presentan diferencias significativas, por lo cual se puede establecer un promedio de $k = 0,59$ para las densidades superiores.

En *C. Arabica*, Jaramillo (9) mediante la aplicación del modelo de Monsi y Saeki, encontró coeficientes de extinción de 0,49 para la variedad Catuai y de 0,42 para Borbón amarillo, sembradas a 3,5m x 3,0m y a 4,0m x 3,5m, respectivamente. Aunque se trata de variedades diferentes, al igual que para la variedad Colombia en el presente estudio, el mayor valor de k corresponde a la población que posee la mayor densidad de siembra y el índice de área foliar más alto.

Un coeficiente de extinción pequeño, como ocurre en las densidades menores (0,41 y 0,47 para 2500 y 5000 plantas.ha⁻¹, respectivamente, (Tabla 5) significa que menor cantidad de irradiancia es absorbida por unidad de IAF y, por tanto, hay una mejor distribución de la RFA a través del dosel. Shibles (16) establece que un k bajo podría beneficiar sustancialmente la fotosíntesis del follaje, siempre y cuando está acompañado de un IAF alto; en cultivos en donde el espaciamiento o los patrones de siembra imposibilitan tener un IAF alto, un k bajo puede ser inconveniente. Este puede ser el caso de la densidad de 2500 plantas.ha⁻¹, que con

$k=0,41$, presenta el IAF más bajo (3,3) y la mayor pérdida de RFA (34% de transmisividad por parcela).

En el presente estudio la disposición de las plantas en el terreno en cuadrado o en rectángulo no ejerció efecto importante sobre el área foliar y el índice de área foliar en las diferentes densidades y por consiguiente también es de esperarse que no tenga ningún efecto sobre la producción. Los resultados obtenidos también permiten sugerir que por encima de densidades de 10000 plantas.ha⁻¹, se empiezan a presentar limitaciones severas para el uso eficiente de la luz por la planta y en consecuencia la producción se verá también afectada. El trabajo define además para el cultivo del café sus coeficientes de extinción para densidades de siembra entre 2500 y 12500 plantas.ha⁻¹.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA, P.J. Desarrollo foliar y otros componentes de producción de la variedad Colombia. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. CENICAFÉ. Informe anual de labores de la Sección de Fito fisiología 1988-1989. Chinchiná, Cenicafé, 1989. p. 42-44.
2. ARCILA, P.J. Métodos rápidos para la determinación del área foliar del café en el campo. In: CONGRESO Anual, 21 y Simposio Nacional sobre Fisiología de la Nutrición Mineral, 1. Manizales 20 - 22 de febrero de 1991. Resúmenes. Manizales. COMALFI. Manizales, 1991. p. 77.
3. ARCILA, P.J. Productividad potencial del café en Colombia. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ. 50 años de investigación en café. Conferencias Conmemorativas. Chinchiná, Cenicafé. 1992. p. 105-119.
4. ARCILA, P.J.; CHAVES C., B. Desarrollo foliar del café en tres densidades de siembra. Cenicafé 46(1):5-20. 1995.
5. DELTA-TDEVICES LTD. Sunfleck Ceptometer User's Manual. Copyright Decagon Devices, England. 30 p. 1987.
6. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ. Proyecto Fase Reproductiva del Café. Experimento FIT0409. Efecto de la densidad de siembra en la producción de la variedad Colombia. Chinchiná Cenicafé, 1990. 9p. (Mimeografiado).
7. GOMEZ G., L.; JARAMILLO R., A. El clima de la zona cafetera su relación con el cultivo del café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ. 50 años de investigación en café. Conferencias Conmemorativas. Chinchiná, Cenicafé. 1992. p. 23-32
8. JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. Annals of Botany. 44: 381-388. 1979.
9. JARAMILLO, R., A. Flujos de radiación solar y de energía en cafetales. Atmósfera 11:13-24. 1986.
10. JONES, H.G. Plants and microclimate. 2nd. ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1992. p. 1-44
11. LAKSO, A.N.; MUSSELMAN, R.C. Effects of Cloudiness on Interior Diffuse Light in Apple Trees. Journal American Society Horticulture Science. 101 (6): 624-644. 1976.
12. KUMAR, D. Investigation into some physiological aspects of high density planting of coffee (*Coffea arabica* L.) Kenya Coffee 43 (510): 263-272. 1978.
13. MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. Annals of Botany 29 (113):17-37. 1965.
14. ROSS, J. The radiation regime and architecture of plant stands. The Hague, Junk Publishers. 1981. 391p.
15. SAEKI, T. Light relations in plant communities. In: EVANS, L. Environmental control of plant growth. New York, Academy Press. 1993. p. 79-94
16. SHIBLES, R. Crop Physiology. Ames, Iowa State University Press, 1983.
17. SQUIRE, R.J. The physiology of tropical crop production. Wallingford. C.A.B. International. 1990. 236p.

18. TROJER, H. Distribution horizontal de luminosidad en un cafetal y en almácigos. Boletín Informativo Cenicafé 4(45):20-32. 1953.
19. VALENCIA, A., G. Relaciones entre el índice de área foliar (IAF) y la productividad del cafeto. Cenicafé 24 (4): 79-89. 1973.
20. VAN KRAALINGEN, D.W.G.; BREURE, C.J.; SPITTERS, C.J.T. Simulation of oil palm growth and yield. Agric. For. Meteorol. 46:227-244. 1989.
21. WATSON, D.J. The dependence of net assimilation rate on leaf area index. Annals of Botany 22 (85):37-54. 1958.