

Análisis y Comentario

EL CULTIVO DEL CAFETO (*Coffea arabica* L.)
AL SOL O A LA SOMBRA: UN ENFOQUE AGRONÓMICO Y ECOFISIOLÓGICO¹

Luis A. Fournier*

ABSTRACT

A review of coffee planting under shading and full sunlight. A review of agronomic and ecophysiological information on coffee plantations under shading or full sunlight is presented in this paper. The literature shows that coffee under full sunlight yields 10-20% more than under managed shading; however the information available is not enough as to give a final recommendation in favor of any of these two systems. It seems necessary to determine if plantations under full sunlight have a shorter economic life than those under managed shading and if the cost of replanting is compensated by its higher yield in a long period of time. On the other hand some questions have been arisen regarding the long range effect of planting coffee without shading in the biological, chemical and physical properties of the soil. Therefore, it is suggested that further research should be advanced on these economic and edaphic matters, before giving a final answer to this problem.

INTRODUCCION

Pérez (1977) ha señalado que el cultivo del café se inició en Costa Rica en forma económica a partir del año 1808. Sin embargo, esta planta comenzó a tener un verdadero significado para el país en la segunda parte del siglo 19, cuando se inició su comercio directo con el viejo mundo. Desde aquella lejana época el café ha ocupado un papel fundamental en el desarrollo de Costa Rica, a pesar de los altibajos financieros que produce la crónica periodicidad en su precio en los mercados del exterior.

También ya desde el siglo pasado los costarricenses se han interesado en mejorar el cultivo de esta planta y a este respecto se han obtenido logros

muy significativos en los últimos 30 años (Pérez, 1977).

Uno de los aspectos que la tecnología cafetalera desarrollada en Costa Rica ha fomentado en los últimos 10 años es una disminución en el sombrero de las plantaciones y en algunos casos se ha recomendado el cultivo a plena exposición solar (Fournier, 1980). Así en la última edición del "Manual de recomendaciones para cultivar café" (Costa Rica, OFICAFE, 1983) se indica que la necesidad de sombra depende del clima, la densidad de siembra y el manejo de la planta, y que en las zonas de mayor luminosidad, se necesitan niveles de sombra superiores, especialmente en la época de maduración. También, en esta publicación, se sugiere que en las zonas altas de Costa Rica (1200 msnm o más) en donde hay menor intensidad lumínica, alta humedad y un período seco más corto, se puede considerar la conveniencia de cultivar café a pleno sol.

Es evidente que el cultivo del café bajo sombra regulada o a pleno sol es un tema todavía controversial y por eso se consideró importante prepa-

1/ Recibido para publicación el 16 de octubre de 1987.

* Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

rar una revisión que incluyera los aspectos más relevantes, ecofisiológicos, agronómicos y económicos del problema. El trabajo se basa en la idea que es importante mejorar al máximo la productividad de los cafetos, pero sin que esto signifique un deterioro del suelo, y además, sea económicamente conveniente tanto para el agricultor como para el país.

Análisis de algunas experiencias en el cultivo del café a pleno sol

En 1954, Montealegre inicia un artículo sobre el cultivo del café al sol o a la sombra con la siguiente afirmación: "La controversia secular sobre la sombra arbórea en el cultivo del cafeto sigue hoy tan enconada como al principio de siglo". En este mismo trabajo se analizan varias experiencias negativas de caficultores costarricenses que trataron de cultivar esta especie a pleno sol en Turrialba, Naranjo, Santo Domingo de Heredia y Sarapiquí. También se menciona la experiencia que llevó a cabo, también con resultados negativos, el Centro Nacional de Agricultura de 1927 a 1935 en San Pedro de Montes de Oca.

Montealegre (1954) atribuye todos estos fracasos a que la planta de café es una especie de sombra y que solo en estas condiciones es factible obtener una plantación sana y de alta producción de café de buena calidad por un tiempo relativamente largo.

González (1955) en respuesta a este artículo indica: "Cualquiera que lo lea queda con la impresión de que es cosa definitiva que el cafeto debe cultivarse en Costa Rica a la sombra. Difiero de este criterio y creo más bien que cuando más se avance en el conocimiento de la nutrición del cafeto y en la aplicación práctica del mismo, menor será la cantidad de sombra que sea necesario usar, hasta llegar a su completa supresión en lugares adecuados". Y sugiere que los casos que Montealegre (1954) considera como fracasos del cultivo del café al sol y que utiliza como pruebas en favor de su tesis, no tienen suficiente valor probatorio, porque dichas plantas no fueron adecuadamente fertilizadas.

También refuta una afirmación de Montealegre (1954) de que la mala calidad del café de Brasil se deba exclusivamente a que esta planta se cultiva allá al sol y sugiere que es un problema más complejo. También hace hincapié en que las "chaspas"

no son causadas por el mero hecho de cultivarse el café al sol, sino que de nuevo es un problema de nutrición mineral. Menciona además que en Costa Rica hay agua y luz en abundancia para un adecuado crecimiento del cafeto, pero existen bastantes deficiencias minerales. En su opinión la sombra equilibra esta desproporción ya que al disminuir la luz se disminuye la actividad de la planta y se logra así un equilibrio adecuado entre el crecimiento del cafeto y la producción, pero a costa de una disminución de ésta última.

González (1955) afirma, finalmente, que en Costa Rica, en el futuro, con un mejor conocimiento de la nutrición mineral del cafeto, se podrá disminuir gradualmente la sombra y junto con otras medidas culturales será posible obtener producciones de cuarenta y más fanegas por manzana.

Montealegre (1955) publica un nuevo artículo sobre este tema en respuesta al de González (1955). En este trabajo reitera su afirmación de que en Costa Rica el cultivo del café se debe llevar a cabo bajo sombra, y que el caso de Hawaii en donde el cultivo se hace a pleno sol y se obtienen muy altos rendimientos es una situación especial debido a las condiciones climáticas del sitio. Sin embargo, menciona que no se ha dicho mucho sobre la calidad del café que se produce en ese lugar. Desde el punto de vista fisiológico, afirma que como ya lo indicó en su artículo anterior, la plena exposición solar produce un exceso de luz que interfiere en la función clorofiliana del cafeto; y que además esto motiva cambios muy bruscos de temperatura entre el día y la noche que también perjudican el metabolismo de la planta. Coincide con González (1955) que conforme se logre un mayor conocimiento sobre la nutrición mineral del cafeto se podrá obtener mayor producción.

La polémica no finalizó aquí y González (1956) publica un nuevo artículo en que comenta el anterior de Montealegre (1955). Indica este autor que Montealegre (1955) considera que el cafeto es una planta de sombra con base en los estudios del fisiólogo inglés Nutman y en el hecho de que esta especie crezca de manera natural en condiciones de bosque. Para refutar esta afirmación menciona el trabajo de Alvim (1953) en que se indica que Nutman no llegó a definir con seguridad si el cafeto es fisiológicamente una planta de sol o de som-

bra. Ya que Nutman (1937 a, b) encontró que las hojas del cafeto expuestas al sol fotosintetizan menos que las sombreadas y que esto se debe al cierre parcial de los estomas que reciben más luz. Sin embargo, Alvim (1953) indica que no se puede concluir que el cafeto produce menos al sol que a la sombra por el solo hecho de que al sol se afecte más la apertura de los estomas. Esto se presenta tanto en plantas de sol como de sombra, y de todas maneras las hojas de una planta de café, dependiendo de su posición reciben diferentes intensidades de luz.

González (1956) no concuerda con Montealegre (1955) en que el cafeto sea sensible a grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche y que por lo tanto la sombra sea más importante a alturas mayores de 1000 msnm en Costa Rica. El primer autor considera que al cafeto lo perjudican las heladas, pero no es afectado por temperaturas que generalmente oscilan entre 12 y 25°C. Respecto a la "quemadura de los retoños" en la altura (el derriete, *Phoma costarricensis*) indica que el clima y la nutrición son determinantes para el mayor o menor efecto del hongo, y que una buena nutrición puede evitarlo. Finalmente insiste en la importancia de una buena nutrición mineral del café cultivado al sol, ya que cualquier cultivo al sol demanda mejor nutrición y que si no se hace, se pueden producir ciertos desequilibrios nutricionales, por ejemplo, una mayor demanda de manganeso o de nitrógeno.

Esta polémica finalizó con un último artículo de Montealegre (1956) en el que reitera una vez más sus puntos de vista.

Carvajal (1985) indica que el cultivo del café bajo sombra es común en los países de América Central, Colombia y México principalmente; mientras que el cultivo de solana es práctica corriente en Hawaii, Brasil (con pocas excepciones), Kenia y otros países.

Menciona ese autor varios trabajos en Colombia, Kenia y Brasil con cafetos cultivados tanto al sol como a la sombra y con planta de almácigo y en producción. En términos generales estas investigaciones muestran que el exceso de sombra afecta drásticamente la morfología de la planta así como la producción de frutos. Sin embargo, los frutos de plantas cultivadas al sol tienden a ser más pequeños que los provenientes de plantas bajo sombra. También se menciona que en Brasil la humedad del

suelo en la época seca es un factor limitante para el cultivo bajo sombra, por la competencia que los árboles ejercen por este elemento sobre los cafetos.

Carvajal (1985) concluye que cuando el cafeto se cultiva al sol es necesario tener un buen plan de fertilización que compense la mayor demanda de nutrimentos que tiene la planta al aumentar su producción.

Por su parte Suárez de Castro *et al.* (1961) observaron en El Salvador que en cultivos bajo sombra, los contrastes de temperatura entre el día y la noche son menores que a pleno sol; lo que favorece el mantenimiento de un porcentaje mayor de humedad relativa en la plantación. También se observó una disminución en la temperatura del suelo hasta una profundidad de 40 cm. La arquitectura de las plantas también mostró diferencias entre el ambiente de solana y de umbría y se produjo una mayor cosecha al sol durante la duración del experimento.

Peréz y Gutiérrez (1978) informan de una serie de experimentos con varios cultivares de café en diferentes condiciones ecológicas de Costa Rica. Sus observaciones muestran que en un promedio de varias cosechas, el cultivar 'Caturra' superó a todos los demás y que en condiciones de sombra regulada de *Inga* sp. y *Erythrina* sp. y con alta densidad de siembra produjo un rendimiento de 40,4 fanegas/manzana (14782 kg/ha). Pérez (1977) menciona también los notables avances que llevó a cabo la caficultura costarricense de 1950 a 1975 en que, de un promedio de 7,87 fan/mz (2882 kg/ha) en la cosecha 1950-51, a partir de la cosecha 1966-67, los rendimientos se han mantenido arriba de las 20 fan/ha (7324 kg/ha). Sin embargo, este autor al referirse al aspecto del cultivo del café bajo sombra o al sol indica lo siguiente: "En la actualidad (1975) con más del 50% del área bajo cultivo intensivo, la sombra se ha reducido con el propósito de dar mayor luz a los cafetos y en consecuencia obtener más cosecha por área".

No obstante, los experimentos que el Departamento de Café ha llevado a cabo sobre sol y la sombra regulada, desde 1956, combinando diferentes sistemas de siembra y de poda, demostraron que en las condiciones de Costa Rica el cultivo al sol, en comparación con sombra balanceada, produce apenas un 10% más de cosecha por ha. Por otro lado, al sol la "Chasparria" (*Cercospora coffeicola*)

se presenta con mayor intensidad y la mayor cantidad de malas hierbas aumenta el costo de su control.

La información más reciente obtenida en Cota Rica sobre la productividad del café al sol y a la sombra muestra siempre un aumento en la producción de un 10-20% cuando el cultivo se hace a pleno sol, sin embargo, los experimentos cubren un período relativamente corto de observaciones y además no se ofrece mayor información sobre la calidad del grano y los problemas fitopatológicos que se han citado (Costa Rica, OFICAFE-MAG, 1985, 1986).

Por otra parte es bueno mencionar que en los últimos años se ha desarrollado en los trópicos un marcado interés por los sistemas agroforestales, como una modalidad de sistema de producción que además de tener ciertas ventajas ecológicas sobre los monocultivos, permite obtener tanto productos agrícolas como forestales en un mismo sitio. Y precisamente algunos de estos sistemas incluyen el cultivo del café con árboles forestales (Fournier, 1981; Fassbender *et al.*, 1985; Heuveldop *et al.*, 1985).

Bases ecofisiológicas de la producción del café al sol y a la sombra

La productividad de una planta en términos ecofisiológicos es la cantidad de materia orgánica acumulada en un período de tiempo en relación a una determinada área foliar (Ziegler, 1983).

La productividad depende fundamentalmente de la fotosíntesis y por ende requiere un suministro óptimo de agua, luz, temperatura y sales minerales (Larcher, 1984) y de un adecuado funcionamiento del resto de los procesos fisiológicos de la planta tales como: respiración, transpiración, síntesis de proteínas, absorción y traslado de agua y sales minerales, traslado de sustancias metabólicas, crecimiento y diferenciación, etc.

Las plantas se dividen en especies de solana y de umbría, según la cantidad de luz en que llevan a cabo una adecuada cantidad de fotosíntesis. Esta condición adaptativa se correlaciona, entre otras cosas con diferencias en la concentración de los componentes de la cadena de transporte de electrones, la actividad del fotosistema y con algunas de las enzimas específicas de ciertas etapas del proceso de foto-

síntesis (Beadle *et al.*, 1985). En el Cuadro 1 tomado de Larcher (1984) se muestran las principales diferencias estructurales y fisiológicas de las hojas de estos dos tipos de plantas.

Recientemente, en un simposio sobre la ecología y ecofisiología de las plantas en los bosques mesoamericanos se presentaron varios trabajos sobre el efecto de diferentes intensidades de la luz sobre el crecimiento de plantas leñosas tropicales, que pueden suministrar al lector información más detallada sobre este tema (Fetcher *et al.* 1987; Field, 1987).

Los estudios básicos sobre la fisiología de la fotosíntesis que llevó a cabo Nutman (1937a, b) fueron los que promovieron con mayor intensidad la controversia, aún vigente, sobre el cultivo del café al sol o a la sombra, y sobre este tema se han publicado numerosos trabajos de investigación y de revisión (Cannell, 1971, 1976; Glätti, *et al.* 1980; Jones y Mansfield, 1970; Kumar y Tieszen, 1980a, 1980b; Maestri y Santos Barros, 1977; Nunes *et al.*, 1968; Sylvain, 1955).

Según Cannell (1976) las plantas de café se pueden considerar como convertidoras de CO₂ y de energía solar en carbohidratos, los cuales se utilizan en la producción de frutos. Se tiene entonces, que los factores determinantes de la producción en café son aquellos que afectan:

- a) el área foliar disponible para la absorción del CO₂ y la luz,
- b) la tasa de absorción de CO₂ por unidad de área foliar y
- c) la distribución de la materia seca entre frutos y otras partes de la planta primaria.

Este autor considera que la manera más efectiva de aumentar la productividad del café y por ende su cosecha, es aumentar el área de follaje adecuadamente iluminada por unidad de área cultivada. Esto aumentará el número de nudos y por lo tanto, el número de botones florales. Opina que la planta de café tiene capacidad potencial para producir un dosel grande y bien estructurado y que las plantas jóvenes invierten del 40-45% de su materia seca por año en la producción de nuevas hojas.

Es por lo tanto importante determinar la distancia de siembra que produzca un dosel con

Cuadro 1. Diferencias entre las plantas de solana y de umbría con respecto a la hoja (Larcher, 1984)

Característica	Hoja de sol	Hoja de sombra
Estructurales y fisonómicas		
Area foliar	-	+
Espesor del mesófilo	+	-
Sistema de espacios intercelulares	+	-
Número de células	+	-
Densidad de venación	+	-
Espesor de la pared celular externa de las células de la epidemis y la cutícula	+	-
Densidad de estomas	+	-
Número de cloroplastos por unidad de superficie	+	-
Densidad de los grana en un sistema de membranas de los cloroplastos	-	+
Químicas		
Peso seco	+	-
Contenido de la humedad por peso húmedo	-	+
Concentración del jugo celular	+	-
Contenido de energía de la materia seca	+	-
Almidón	+	-
Celulosa	-	+
Lignina	+	-
Acidos orgánicos	+	-
Lípidos	+	-
Antocianina y flavonoides	+	-
Cenizas	+	-
Relación Ca/K	+	-
Clorofila a/b	+	-
Clorofila a1 (P 700)	+	-
Fotosistema II complejo de pigmentos	-	+
Clorofila/xantofila	-	+
Luteína/violaxantina	+	-
Fisiológicas		
Potencial fotosintético	+	-
Intensidad de respiración	+	-
Transpiración	+	-

buena capacidad de transmisión de luz y un adecuado "Índice de Area Foliar" (IAF). Valencia (1973) ha sugerido que el IAF óptimo para 'Caturra' es de 8 y que éste se puede obtener en tres años con 10.000 plantas/ha o en cuatro años con 5.000 plantas/ha.

En estas condiciones el punto de compensación de las hojas sombreadas es por lo general menos del 1% de la radiación que llega al sitio en un día tropical soleado y permite la penetración de la luz en muchas capas de hojas (Valencia, 1973).

Cannell (1976) opina que es importante que las ramas superiores de la planta sean erectas y que las hojas se extiendan de manera vertical en una buena distancia. Esto permite una arquitectura de la planta en la que la mayoría de las hojas reciben sombra moderada y la radiación lumínica incidente y la térmica se aprovechan en una gran área de follaje. Este es un rasgo de importancia para las plantas que están adaptadas a la umbría, ya que sus hojas fotosintetizan más rápido en sombra moderada que a pleno sol.

Por otra parte, Cannell (1971) indica que en plantas de café con bastante espaciamiento, el área foliar puede variar entre 500 a 1,500 dm² y que en condiciones favorables de tiempo el área mínima foliar necesaria para mantener un fruto y permitir un crecimiento vegetativo satisfactorio para el próximo año, es de más o menos 20 cm². Así, teóricamente, en cada nudo el área foliar disponible (40-60 cm²) solo podría mantener 2-3 frutos, aunque en la realidad se presentan hasta unos 20. Esto precisa de un suministro adicional de productos metabólicos, que proceden de ramas secundarias y de hojas de muchos nudos aparte de la rama en que crecen los frutos. Así que en el momento de pleno desarrollo de la cosecha la mayor parte del área foliar debe suministrar sustancias metabólicas a los frutos.

La máxima productividad anual de una plantación con cafetos con 1.500 dm² de hojas cada uno es de 200 kg/ha de frutos secos.

Esta situación de competencia entre las partes vegetativas y los frutos se manifiesta en el comportamiento fenológico de la planta de café (Fournier, 1961; Fournier y Herrera de Fournier, 1983). También es notable en este período de competencia por las diferentes partes de la planta de café una propensión a la caída de frutos inmaduros, "purga", y al ataque de ciertas enfermedades fungosas. Este problema ha sido analizado recientemente por Ramírez (1987). También la literatura muestra que la aplicación foliar de soluciones azucaradas y de nitrógeno ayuda a disminuir este estrés hídrico y nutricional (Montoya *et al.*, 1961; Montoya y Sylvain, 1962). Se ha sugerido que variaciones en el contenido de reguladores de crecimen-

to es también un aspecto que influye en este problema de competencia entre las partes vegetativa y reproductiva del cafeto (Briceño, 1983).

Cannell (1976) informa que la máxima fotosíntesis neta en hojas de café, unidas a la planta, que se ha observado es de unos 7 mg CO₂/dm²/h a una temperatura de 20°C. Como esta planta tiene un punto de compensación relativamente bajo es de esperar que aún a temperaturas ambientales de 20° a 25°C la tasa fotosintética neta sea baja. A plena exposición solar la temperatura de la hoja se ubica arriba de los 20°C y las expuestas a la luz directa pueden alcanzar temperaturas de hasta 40°C. A una temperatura superior a los 20°C aumenta gradualmente la fotorespiración y la concentración interna del CO₂, lo que induce el cierre de los estomas. Según este autor, en condiciones de campo esto repercute también en una disminución del potencial hídrico de la hoja, lo que también afecta el cierre de los estomas, la actividad de la carboxilasa y una posible reducción en RUDP (ribulosa difosfato).

Nunes *et al.* (1969) han mostrado que aunque se varíe la radiación y se disminuya el estrés hídrico, siempre se produce una reducción de hasta un 7% en la tasa de fotosíntesis neta con temperaturas de 20° y 30°C. Esos autores observaron que por cada grado que se aumenta la temperatura arriba de los 24°C se produce un incremento de 20 ppm de CO₂ y que esto, repercute en el cierre de los estomas; además se aumenta la resistencia a la conductividad de estas estructuras foliares.

También se informa en la literatura de otros daños en las hojas del cafeto por exceso de radiación solar, tanto estructurales (quemadura de los bordes, formación de corcho, clorosis) como fisiológicos (efectos negativos en el fotosistema II) (Huxley, 1967).

En una revisión sobre fisiología del cafeto Maestri y Santos Barros (1977) indican que se ha observado que el contenido de CO₂ en los espacios intercelulares de las hojas de café aumenta logarítmicamente hasta unos 30°C y con mayor rapidez a los 35°C. Esos autores indican que el punto de compensación del CO₂ en café no es un valor fijo ya que se ha observado

un ritmo endógeno en el punto de compensación en experimentos con hojas separadas de la planta a una temperatura de 23°C y luz continua de 8000 lux. Esto sugiere que el momento más apropiado para determinar este punto es a la mitad del fotoperíodo.

Maestri y Santos Barros (1977) consideran que aunque la planta de café se clasifica como C₃ y en apariencia muestra fotorespiración, el origen del aumento de CO₂ en el mesófilo con temperaturas crecientes, no es fácil de explicar, ya que en condiciones de campo las altas temperaturas coinciden con alta luminosidad. Una alta temperatura y una alta luminosidad en períodos secos reducen el crecimiento de las ramas y las hojas en favor de troncos y sistema radicular. Esto parece ser en buena parte controlado por reguladores de crecimiento (Briceño, 1983).

Kumar y Tieszen (1980a) estudiaron la fotosíntesis del café (*Coffea arabica*) y el movimiento de los estomas en condiciones tropicales a varias temperaturas e intensidades de luz. Sus observaciones muestran que en las plantas bajo sombra la saturación por irradiación lumínica se alcanza a 300 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, mientras que en las plantas a plena exposición solar la saturación tuvo lugar a 600/ μE . Sin embargo, las plantas a la sombra mostraron tener tasas fotosintéticas sustancialmente más altas. La tasa de fotosíntesis disminuyó arriba de los 25°C, aparentemente debido a una disminución en la conductividad del mesófilo, ya que la conductividad estomática se mantuvo estable entre los 25° y 35°C. La mayor parte de estas observaciones se llevaron a cabo con plantas de almácigo en bolsas plásticas. Estos autores consideran al cafeto una planta adaptable a altas densidades de siembra, en donde el autosombreamiento, que acarrea baja intensidad lumínica y bajas temperaturas en la hoja, produce un ambiente favorable para el crecimiento.

Kumar y Tieszen (1980b) en otro estudio de campo y de invernadero observaron que los cafetos varían en su respuesta al estrés hídrico, tanto en su potencial hídrico foliar como en la tasa de fotosíntesis neta cuando se reduce el potencial hídrico. Si el poder evaporativo de la atmósfera era alto, las plantas mostraron estrés

hídrico aún cuando el suelo se mantuvo cerca de su capacidad de campo. Además, los potenciales hídricos durante el período de alta demanda de humedad por la atmósfera (11:00 a 15:00 horas) disminuyeron a -15 y -18 bares. A 55% de capacidad de campo del suelo el descenso de los potenciales hídricos de las plantas, durante las horas más cálidas, no fue significativamente diferente que el de las que crecían en capacidad de campo. Esto se debe, probablemente, como indican Tesha y Kumar (1977) a que las raíces del café presentan una alta resistencia al flujo del agua. A menos del 50% de capacidad de campo las plantas en potes no pudieron mantener su turgencia en la siguiente mañana aunque si lo hicieron las de condiciones de campo en el mismo nivel hídrico.

Por debajo de 40% de la capacidad de campo las plantas en potes se mantuvieron marchitas hasta que fueron regadas.

Los estomas permanecieron abiertos durante la mayor parte de las horas del día en un ámbito de humedad de 100 a 55% de capacidad de campo. Después de las 15:00 horas, a pesar que las condiciones hídricas internas de la planta mejoraron, la conductividad de los estomas se redujo, debido probablemente a características intrínsecas a la planta de café. Debajo del 50% de capacidad de campo la conductividad de los estomas fue muy baja, debajo de 40% prácticamente permanecieron cerrados durante el día en los potes, aunque en condiciones de campo se comportaron un poco diferente. Al relacionar estos aspectos hídricos y de conductividad estomática con la fotosíntesis de las plantas de café, se observó que éstas alcanzan un máximo de fotosíntesis aún en el nivel de 55% de capacidad de campo del suelo hasta las 10:00 horas. Pero se puede esperar una reducción en este proceso aún en las mismas condiciones de humedad entre las 10:00 a 15:00 horas; este efecto es más marcado a temperaturas mayores de 25°C.

Esto se debe probablemente a una menor conductividad de los estomas y menos tasa de asimilación del CO₂. Esta situación parece ser más crítica en dichas plantas debido a que entre las 10:00 y 15:00 horas a una humedad menor del 50% de capacidad de campo el poten-

cial hídrico es siempre menor de -20 bares y la conductividad permanece baja.

Kumar y Tieszen (1980b) consideran que todavía no está muy claro el mecanismo mediante el cual la fotosíntesis se reduce por efecto de bajos potenciales hídricos de la hoja, pero sugieren que los estomas juegan un papel muy importante a este respecto. Esto debido a que hay una gran correlación entre la fotosíntesis y la conductividad de la hoja. Sugieren también que un incremento que se produce en el ácido abscísico durante el estrés hídrico afecta el control del movimiento de los estomas.

Esta situación ha sido observada en otras plantas (Ziegler, 1983).

Glätti *et al.* (1980) estudiaron el efecto de la temperatura sobre la fotosíntesis neta y la respiración celular en la oscuridad, con plantas de *Coffea arabica* L. cv. Bourbon Choussy de 18 meses de edad, en una cámara de crecimiento. Las temperaturas variaron de 15° a 35°C con intervalos de 5° y las plantas se mantuvieron durante el estudio en un fotoperíodo de 12 horas de luz (7:30 a 19:30) y de 12 horas de oscuridad (19:30 a 7:30) y a una luminosidad constante de 500 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{h}$. Las observaciones se hicieron con ramas de plantas intactas. En este trabajo se determinó que tanto la fotosíntesis neta como la respiración celular en la oscuridad son de mayor magnitud en café, cuando para una determinada temperatura, la temperatura del día anterior es menor que ésta. La marcha del proceso de asimilación aún en condiciones constantes en la cámara de crecimiento muestra un óptimo entre las 12:30 y las 16:30 horas. La tasa promedio de respiración celular en la oscuridad varía entre 0,05 $\text{mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$ a 15°C, y 0,47 $\text{mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$ a 35°C. Por otra parte la máxima tasa de asimilación neta fue de 4,5 $\text{mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$. Estos resultados son bastante similares a los obtenidos en condiciones de campo por Bergmann *et al.*, (1970) con plantas de 'Caturra' en Cuba. Esos autores obtuvieron una tasa de asimilación de 2,4 a 4,8 $\text{mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$, variando según el momento del día y el grado de exposición de la hoja. Por otra parte, Glätti, *et al.* (1980) observaron que cuando la temperatura se eleva de 15°C a 35°C por incrementos de 5°C diaria-

mente, la temperatura óptima para la fotosíntesis neta es de 30°C, pero si el cambio es inverso (de 35°C a 15°C) el óptimo para este proceso se localiza entre 20-25°C.

En los párrafos anteriores se ha mostrado que la temperatura y la luminosidad son dos factores de importancia en la regulación de la fotosíntesis neta en café. Sin embargo ambos factores no sólo interaccionan entre sí para definir el nivel óptimo de condiciones ambientales propicias para este proceso fisiológico, sino que en mucho su acción depende del estado hídrico de la planta. La tensión hídrica puede afectar la fotosíntesis en varias formas: cierre de los estomas, aumento en la resistencia a la conductividad en los estomas y en las células del mesófilo, disminución de la actividad enzimática y acúmulo de almidones.

El efecto de la tensión hídrica en café (*Coffea arabica* L.) ha sido estudiada desde hace ya bastante tiempo. Cannell (1976) indica que el crecimiento de los vástagos vegetativos no se puede mantener, en condiciones de alta luminosidad y alta temperatura, debido a la resistencia interna al movimiento del agua. Biershuizen *et al.* (1969) sugieren que una disminución en el estado de turgencia de la hoja, asociada a una tensión hídrica en el suelo tiene relación con el cierre de los estomas.

También se puede pensar en un efecto de la conductividad de las células del mesófilo sobre la fotosíntesis. La resistencia a la conductividad de las células del mesófilo es un problema complejo que puede incluir entre otras cosas inhibición del transporte de electrones y disminución de la actividad enzimática. Parece entonces, que los bajos potenciales hídricos reducen la tasa neta de fotosíntesis debido a su influencia sobre los estomas, y que bajos potenciales hídricos asociados a un aumento en la temperatura pueden disminuir también la tasa fotosintética por reducción tanto de la conductividad del mesófilo como de los estomas. Este es un aspecto que es necesario investigar con mayor detalle.

En un estudio reciente Oberbauer (1985) demostró que en las condiciones del premontano muy húmedo de Costa Rica las especies arborecentes pioneras de la sucesión ecológi-

ca tienen mayor conductividad estomática que las que se ubican en estados más avanzados de la sucesión. Como el cafeto es una planta de sotobosques, es probable que inherentemente tenga una relativa baja conductividad estomática.

Frischknecht *et al.* (1982) al estudiar el metabolismo de ciertos alcaloides en el desarrollo de las hojas de *Coffea arabica* L. en relación con la longitud del día, la temperatura y la luz, observaron también el aumento en área foliar, el peso seco, la tasa de fotosíntesis neta y la respiración celular en la oscuridad. Este estudio se llevó a cabo en una cámara de crecimiento con plantas de 12 a 18 meses, con períodos de iluminación de 12 horas y con radiación fotosintéticamente activa con temperaturas diurnas/nocturnas de $24 \pm 0,5/18 \pm 0,5$ y adecuadas condiciones de humedad.

Estos autores de nuevo observaron un patrón de la fotosíntesis neta similar al que se ha discutido anteriormente. Durante la mañana se alcanza la tasa más alta de este proceso y durante la tarde, sin ningún cambio en las condiciones ambientales la tasa disminuye entre 30-60%. Por otra parte mencionan también que al disminuir la temperatura del aire de 24°C a 15°C hay un descenso en la tasa de fotosíntesis neta de 15% después del primer día y de 40% después de 6 días. Pero un cambio de temperatura de 24°C a 33°C produce un descenso del 40% durante el primer día. Es interesante anotar sin embargo, que 6 días después estas últimas plantas alcanzan de nuevo la misma tasa de fotosíntesis neta que tenían a 24°C . Hay pues un período de readaptación a las nuevas condiciones de temperatura. En lo que respecta a la respiración celular en la oscuridad, después del período de readaptación ésta es 40% menor a 15°C y 50% superior a 33°C comparada con la tasa a 24°C (Frischknecht *et al.*, 1982).

DISCUSION

El análisis presentado en páginas anteriores, sobre aspectos ecofisiológicos importantes para la productividad del cafeto, muestra los siguientes rasgos sobresalientes:

- 1- Las plantas de café a pleno sol producen, en términos generales, de un 10 a 20% más que las cultivadas bajo sombra regulada, pero sus frutos son de menor tamaño.
- 2- Las plantas a pleno sol son más susceptibles al ataque de ciertos patógenos (*Cercospora coffeicola*, *Colletotrichum coffeanum*, *Corticium salmonicolor*); en especial durante la época de mayor competencia entre los frutos en crecimiento y el vástago.
- 3- La arquitectura de las plantas cultivadas a pleno sol muestra diferencias notorias con respecto a las cultivadas bajo sombra. Entre otras cosas se pueden mencionar las siguientes: mayor número de nudos, internudos más cortos, hojas más pequeñas, mayor número de estomas por hoja, mayor número de ramas de crecimiento plagiotrópico, menor crecimiento ortotrópico, mayor diferenciación de yemas florales, etc.
- 4- En términos generales se ha observado que la tasa de fotosíntesis neta es mayor en las plantas cultivadas a pleno sol; pero también sucede lo mismo con la fotorespiración y la respiración celular en la oscuridad. La temperatura del día anterior tiene marcada influencia sobre estos procesos.
- 5- Las plantas de café sufren descensos rápidos en su tasa de fotosíntesis neta cuando los días tienen luminosidad y temperatura altas, debido principalmente al cierre de los estomas. Pero también se mencionan como otras causas de esto una disminución en la conductividad de los estomas, un aumento en la concentración del CO_2 en el mesófilo, mayor resistencia a la conductividad en el interior de la hoja; así como un descenso en el potencial hídrico de la planta.
- 6- Aún en condiciones óptimas la fotosíntesis neta del cafeto tiene un ritmo diurno, con una tasa máxima que se presenta por lo general en la mañana.
- 7- En relación con las condiciones ambientales en la plantación, se ha observado que los cultivos a pleno sol tienden a mostrar

cambios más bruscos de temperaturas, tanto diurnas como nocturnas en el aire circundante a las hojas y el suelo. Esto desde luego tiene repercusiones en la fisiología de la planta.

Cabe entonces preguntarse como se relacionan todas estas observaciones ecofisiológicas con la situación actual de las plantaciones comerciales de café.

Como indican Fournier (1980) y Rojas (1987) en los últimos años se han llegado a establecer dos modelos de agroecosistemas cafetaleros, uno de ellos con las plantas cultivadas a plena exposición solar y otro bajo sombra regulada de leguminosas. En ambos la densidad de siembra es de 7.200 plantas por hectárea con una distancia, por lo general de 1,66 m entre hileras y de 0,83 m entre plantas. En el caso de las plantaciones con sombra regulada (con podas totales de la copa de los árboles una o dos veces al año) la distancia entre árboles es de unos 6 x 6 m, con una densidad de 275 árboles/ha. Estos árboles se mantienen a una altura de fuste de 3 m y unos 2 m de altura de copa y en su máxima cobertura alcanzan aproximadamente unos 9 m². Por su parte las plantas de café, en su máximo desarrollo de vástago, presentan aproximadamente unos 0,72 m² de cobertura.

En el Cuadro 2 se muestran algunas características estructurales y espaciales de estas plantaciones de café con alta densidad de siembra. Es necesario mencionar que los valores consignados en este cuadro se refieren a un estado máximo de desarrollo tanto de la cobertura de los cafetos como de los árboles de sombra. Esta situación varía mucho durante el año, tanto por la poda de los árboles como de las plantas de café, lo que produce fuertes cambios en el "Índice de Área Foliar" y por ende en la penetración de la luz en los varios estratos de hojas.

Las cifras que se consignan en el Cuadro 2 son también representativas de la estructura de las plantaciones de café a pleno sol, con excepción, desde luego, de las que se refieren a los árboles de sombra.

Cuadro 2. Algunas características de las plantaciones de café de alta densidad en una hectárea.

Número de plantas de café	7.200
Cobertura de las plantas de café	5.200 m ²
Área libre de cobertura de café	4.800 m ²
Número de árboles de sombra	275
Cobertura de árboles de sombra	2.475 m ²
Cobertura libre de sombra	7.525 m ²
Área basal de los árboles	40 m ² (DAP promedio de 40cm)
Área foliar de los cafetos	100.800 m ² *
Producción teórica máxima de frutos frescos	100.800 L (252 fanegas)**

* Calculada con base en la información del Programa Cooperativo ICAFE-MAG, Costa Rica (1986).

** Calculada con base en la información de Carnell (1976) y Fournier (1961).

La distribución de la luz en estos sistemas es de fundamental importancia para la fisiología de la planta de ahí la necesidad de darle especial atención a la poda de árboles y cafetos.

Larcher (1984) indica que los rayos infrarrojos se reflejan en las hojas en alrededor de un 70%, mientras que en la luz visible este valor es de 6-12%. La reflexión de la luz en las hojas depende de la textura, pubescencia y otras características de estos órganos. Por otra parte, al pasar la luz a través de los tejidos de la hoja se absorbe un 70% de la luz visible en los cloroplastos, así como un 97% de la energía térmica (arriba de los 7.000 nm).

Así conforme la luz se mueve a través del follaje sufre notables alteraciones cualitativas y cuantitativas.

Monsi *et al.* (1973), citados por Larcher (1984) propusieron como medida de esta gradual alteración de la luz el "Coeficiente de Extinción", valor que depende de la intensidad de la luz que alcanza los primeros estratos de hojas y del "Índice de Área Foliar". En una planta como el café este coeficiente puede ser de 0,70 a la mitad de la altura de la planta, aunque puede variar bastante según el cultivar, posición en el terreno, poda, y nivel de sombra que haya en la plantación. Y también depende en mucho del momento del día y del grado de nubosidad del sitio.

Por lo tanto cuando se cultiva café bajo sombra es necesario mantener un adecuado equilibrio del "Índice de Área Foliar" en función del estado fisiológico de la planta y del clima, para poder obtener una buena distribución de la

luz en la plantación, que garantice una productividad satisfactoria de las plantas. Las mismas plantaciones a plena exposición solar y con alta densidad de siembra muestran también alteraciones notables en la luz al paso por los diferentes estratos de hojas, lo que se ha denominado como "autosombreamiento". Es por eso que algunos autores como Ramírez (1986) han sugerido que en las zonas altas, con condiciones climáticas menos severas (comparadas con zonas de 800 msnm con alta radiación, sequías prolongadas y suelos de baja fertilidad) para el cultivo del café, con suelos de buena fertilidad y un manejo tecnificado, *se pueden establecer plantaciones a plena exposición solar*. Lo mismo opina Jiménez (1983) al referirse al cultivo del café en la región de Santa María de Dota. Este autor afirma: "si en nuestra zona las lluvias están bien distribuidas (un verano corto) si no se dan intensidades lumínicas muy altas, si no hay cambios bruscos de temperatura (noche - día), si los vientos no alcanzan velocidades muy altas y si los suelos tienen una buena retención de humedad, entonces, la respuesta es positiva. *Si podemos sembrar al sol*".

Jiménez (1983) considera que muchos caficultores costarricenses demuestran a diario que sí es posible cultivar café al sol en algunas regiones de Costa Rica. Por lo tanto se hace necesario ofrecerle al lector, a estas alturas, cierta orientación que le permita formarse una idea de cuál es en la actualidad la situación con respecto a esta controversia sobre el cultivo del café al sol o a la sombra.

El suelo es uno de los componentes fundamentales del agroecosistema cafetero y entre sus propiedades químicas, el contenido de material orgánico es de primordial importancia. La materia orgánica del suelo no es sólo de significado para este complejo físico-químico-biológico en su última fase, el humus, sino también en las diferentes etapas de la formación de éste (Topp, 1981). Las plantaciones de café a pleno sol acumulan, en términos generales, menos hojarasca que las bajo sombra regulada, lo que hace que el suelo en las primeras sea más susceptible a la erosión y al crecimiento de malezas.

Otro aspecto en que difieren ambos tipos de sistema de manejo de cafetales es con respecto a la temperatura. Suárez de Castro *et al.* (1961) observaron que en cafetales a pleno sol la temperatura de las primeras capas del suelo es superior y además las oscilaciones diurnas son más marcadas. Por otra parte, Franco (1982a, b) observó en un estudio en solución hidropónica (con temperaturas entre 27° y 33°C) que entre 29° y 33°C el aumento de un solo grado de temperatura del sistema radicular redujo notablemente el crecimiento de las plantas. Entre otras cosas observó también variaciones en la absorción de nutrimentos con cambios en la temperatura, en especial una disminución en el traslado del fósforo de las raíces al vástago, con la consecuente disminución en el crecimiento de esta parte aérea de la planta.

Por su parte, Foloni *et al.* (1979) y Tubelis *et al.* (1980) en sus estudios sobre la variación en la temperatura dentro de la atmósfera de la plantación de café observaron cambios notables durante el día y la noche a diferentes alturas de las plantas. Estos estudios muestran que la temperatura dentro de la plantación aumenta (con la altura de la planta) durante la noche y disminuye durante el día. La inversión de los gradientes térmicos tiene lugar de 8:00 a 11:00 a m y las 4:00 a 6:00 p m. La región de la planta con mayores fluctuaciones diurnas se presenta entre 20 a 40% de su altura.

Parece ser entonces que las diferencias más notables que se pueden dar entre un cafetal a plena exposición solar y uno bajo sombra regulada son en relación con las condiciones del suelo y las variaciones en la radiación durante el día. Este último factor, la energía, tiene gran significado en la ecofisiología de la planta, como se mostró anteriormente.

En la literatura no existe información sobre la variación en el contenido de materia orgánica en el suelo de un cafetal a pleno sol en un plazo relativamente largo (unos 25 años). Por otra parte, todos los autores consultados insisten en la necesidad de una adecuada fertilización química para poder mantener los altos rendimientos de producción en estos cafetales. Por lo tanto cabe preguntarse que cambios pueden ocurrir en el suelo a largo plazo, con

una reducción en el contenido de materia orgánica, intensa fertilización con productos químicos y varias aplicaciones de herbicidas por año.

Por otra parte, no todas las características que se han mencionado para las plantaciones a pleno sol se dan en la realidad en toda su plenitud, debido a las altas densidades de siembra. Es interesante anotar que en condiciones de solana la fisonomía de la planta de café se altera y toma una estructura más compacta, que en sombra. Este mismo fenómeno se puede observar en la evolución de la morfología de los cultivos de *Coffea arabica* L. cuando se compara la forma relativamente abierta y porte alto de 'Typica' con la forma compacta y pequeña de 'Caturra'. Así una planta de café a pleno sol en una plantación de alta densidad de siembra tiene un microclima muy diferente a cuando está aislada, sin vecinas cercanas. Es por eso que muchos de los efectos negativos que ejerce la alta radiación térmica, en la práctica no se dan en toda su intensidad en estas plantaciones.

Otro aspecto en que difieren las plantaciones a pleno sol y bajo sombra regulada es en el aporte que los árboles de sombra dan al contenido de nutrientes del suelo, en especial el nitrógeno, tan importante en el crecimiento de café (Carvajal, 1972; Russo, 1984).

Bornemisza (1982) menciona que el nitrógeno es el nutriente más importante para la planta de café y que para una producción de 1800 kg de café solo/ha se consumen 90 kg de nitrógeno. Además las plantas requieren unos 30 kg de este elemento/año/ha. Este autor indica que aunque los árboles de sombra pueden suministrar buena parte del nitrógeno que requiere la plantación, la cantidad que aportan de este elemento las leguminosas, varía entre 1 a 40 kg N/ha/año. Estas cifras parecen ser bajas, pero es importante mencionar la variación que existe en la fijación de nitrógeno con respecto a suelos, climas y especies (Larcher, 1984) además del efecto que tiene la forma en que se manejan los árboles. Por ejemplo, Russo (1984) menciona que en las condiciones de Turrialba, Costa Rica *Erythrina poeppigiana* "Poró Gigante" con una poda total por año produce una biomasa de 22.754 kg/ha, con un contenido de

N, P, K, Ca y Mg de 330,6; 32,4; 155,5; 319 y 86 respectivamente. Esta es una buena prueba de la importancia del reciclaje de nutrientes en el agroecosistema cafetalero bajo sombra regulada. Además, la gran biomasa aportada al suelo por la sombra es de importancia en el control de erosión y en el mantenimiento de la materia orgánica. Recientemente, López (1987) observó diferencias entre el crecimiento y contenido de nitrógeno en tres diferentes especies de *Erythrina*. Esto muestra la necesidad de investigar más en detalle aspectos como: tasas de fijación de N por árbol, lixiviación de N en el suelo, análisis de la distribución de N en la solución del suelo (total, nitratos y amoniacal), durante el año y en función de la fenología de los árboles (Fassbender *et al.*, 1985; Heuvelodop *et al.*, 1985).

Es también de interés mencionar que las raíces de los árboles penetran a mayores profundidades en el suelo de lo que lo hacen las de los cafetos y así no solo modifican las propiedades físicas de éste, sino que llevan a la superficie nutrientes no asequibles a los cafetos (Cadima Zevallos y Alvim, 1967).

COMENTARIO FINAL

Se han mostrado en este trabajo que con una adecuada fertilización, combate de malas yerbas y control fitosanitario es posible obtener altos rendimientos en la producción de café a plena exposición solar. En términos generales esta producción es 10-20% mayor que la obtenida en el mismo sitio con sombra regulada.

Sin embargo, un análisis minucioso de la literatura muestra que no existen todavía suficientes pruebas experimentales que permitan recomendar categóricamente el cultivo del café al sol como la mejor alternativa agronómica, ecológica y económica a largo plazo. Esta afirmación se basa en las siguientes consideraciones:

- 1- Es necesario disponer de información confiable que permita dilucidar si en un plazo de por lo menos 25 años, el cultivo intensivo del café al sol no produce cambios desfavorables significativos en las carac-

terísticas químicas, físicas y biológicas del suelo.

- 2- No se dispone tampoco de información adecuada que permita calcular la periodicidad en el ciclo de renovación de un cafetal a pleno sol; y si un acortamiento de la vida de esta plantación, comparada con la de una con sombra regulada, compensa económicamente el 10-20% de mayor producción en la primera. Se debe recordar, que en 1987 la renovación de una hectárea de café tiene un costo aproximado de $\$500.000,00$ ($\$1,00$ equivale aproximadamente a $\$0,015$ en 1987).
- 3- Es necesario cuantificar mejor el aporte de nutrimentos en especial nitrógeno que hacen los árboles en un cafetal bajo el sistema de sombra regulada. Este tipo de estudios debe incluir pruebas de especies, densidades, frecuencia de podas, así como reciclaje de nutrimentos en el sistema.

Todo esto lleva a pensar que por el momento la alternativa más confiable para la producción de café, por lo menos en las condiciones de Costa Rica, es el modelo de agroecosistema bajo sombra regulada. Y esto se hace más evidente en sitios con temperaturas altas, gran luminosidad, períodos prolongados de sequía y baja fertilidad de suelos.

Además es importante recordar que una plantación de café bajo sombra es un sistema agroforestal, que puede producir otros beneficios además del café, tales como: madera, leña, forraje, así como ventajas de difícil cuantificación como protección del suelo contra la erosión, y una mejor infiltración de agua hacia los depósitos subterráneos.

No obstante todo esto, es posible como afirma Ramírez (1986), que en zonas altas (arriba de los 1200 msnm) con climas moderados y suelos volcánicos fértiles se puede cultivar café a pleno sol, sin que se produzcan cambios desfavorables en el suelo. En estos suelos la descomposición de la materia orgánica es más lenta por la menor temperatura (Fassbender, 1975; Sánchez, 1981) y la hojarasca producida por el café podría suplir en buena parte lo que en otras zonas aportan los árboles de sombra.

Sin embargo, aún en estos sitios precisa llevar a cabo el tipo de estudios que se menciona anteriormente.

RESUMEN

Se preparó una revisión sobre los aspectos agronómicos y ecofisiológicos de importancia sobre el problema del cultivo del cafeto a pleno sol o a la sombra. La literatura muestra que las plantaciones a pleno sol producen un promedio de 10-20% más que las bajo sombra regulada. Sin embargo todavía la información disponible no es suficientemente convincente para recomendar como la mejor alternativa el cultivo del cafeto al sol. Entre otras cosas en este trabajo se menciona la necesidad de estudiar por cuántos años es rentable una plantación de café al sol comparada con una bajo sombra regulada y si la mayor producción de la primera compensa su replantación en un plazo presumiblemente más corto. También se menciona la necesidad de estudiar en un período de por lo menos 25 años, los cambios en las características del suelo que puede producir una plantación sin sombra. Se hace necesario cuantificar en términos financieros el aporte de nitrógeno y de otros nutrimentos minerales con que contribuyen los árboles de sombra al agroecosistema cafetero.

LITERATURA CITADA

- ALVIM P. DE T. 1953. Algunos estudios sobre la fisiología del cafeto. *Suelo Tico* 7:58-62.
- BEADLE, C.L.; LONG, S.P.; IMBAMBA, S.K.; HALL, D.O.; OLEMBO, R.J. 1985. Photosynthesis in relation to plant production in terrestrial environments. Oxford, Inglaterra, Tycooly Publishing Limited. 156 p. (Programa Ambiental de las Naciones Unidas, Serie de Ambiente y Recursos Naturales, v. 18)
- BERGMANN, H.; LERCH, G.; MÜNTZ, K. 1970. Über die physiologische Wirkung von Sonne and Schatten auf *Coffea arabica* L. 'Caturra' unter Freilandbedingungen in Kuba. II. Stoffwechsel von Jungpflanzen. *Z. Pflanzenphysiol.* 63:444 - 460.

- BIERHUIZEN, J.F.; NUNES, M.A.; PLOEGMAN, c. 1969. Studies on productivity of coffee. II. Effect of soil moisture on photosynthesis and transpiration of *Coffea arabica* L. Acta Bot, Neerl. 18:367-374.
- BORNEMISZA, E. 1982. Nitrogen cycling in coffee plantations. Plant & Soils 64:241-246.
- BRICEÑO, J. 1983. Crecimiento vegetativo y reproductivo en relación con niveles endógenos de ácido abscísico y giberelinas en tres cultivares de *Coffea arabica* L. Tesis Mag. Sc. San José, Universidad de Costa Rica. Escuela de Biología, 60 p.
- CADIMA ZEVALLOS, A.; ALVIM, P. de T. 1967. Influencia del árbol de sombra *Erythrina glauca* sobre algunos factores edafológicos relacionados con la producción del cacaotero. Turrialba 17:330-336.
- CANNELL, M.G.R. 1971. Effect of the presence of fruits on net phoytosynthesis. In Annual Report Coffee Research Station, Ruiru Kenya, 1970-71. p. 41-42.
- CANNELL, M.G.R. 1976. Crop physiological aspects of coffee bean yield. Kenya Coffee 41:245-253.
- CARVAJAL, J.F. 1972. Cafeto-cultivo y fertilización. Berna, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 141 p.
- CARVAJAL, J.F. 1985. Cafeto-cultivo y fertilización. 2 ed. Berna, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 254 p.
- COSTA RICA. Oficina del Café, Programa Cooperativo Oficina del Café y Ministerio de Agricultura y Ganadería. 1983. Manual de Recomendaciones para cultivar café. 5 ed. 86 p.
- COSTA RICA. Programa Cooperativo Oficina del Café y Ministerio de Agricultura y Ganadería. 1982. San José. Informe Anual de Labores de 1981. 87 p.
- COSTA RICA. Programa Cooperativo Oficina del Café y Ministerio de Agricultura y Ganadería. 1985. San José. Informe Anual, Instituto del Café de Costa Rica. 176 p.
- COSTA RICA. Programa Cooperativo Instituto del Café y Ministerio de Agricultura y Ganadería. 1986. San José. Informe de Labores de 1985. 140 p.
- FASSBENDER, H.W. 1975. Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 398 p. (Serie: Libros y Materiales Educativos no. 24).
- FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; HEUVELDOP, J.; ENRIQUEZ, G.; FÖLSTER, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y los elementos nutritivos. Turrialba 35: 403-413.
- FETCHER, N.; OBERBAUER, S.F.; ROJAS, G.; STRAIN, B.R. 1987. Efectos del régimen de luz sobre la fotosíntesis y el crecimiento en plántulas de árboles de un bosque lluvioso tropical de Costa Rica. Revista de Biología Tropical 35 (Supl. 1): 97-110.
- FIELD, C.B. 1987. Algunos aspectos importantes para el estudio de la fotosíntesis en bosques tropicales. Revista de Biología Tropical 35 (Supp. 1): 197-200.
- FOLONI, L.L.; TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. DO; VILLA NOVA, N.A. 1979. Estimado de la temperatura diaria del aire en un cafetal. Turrialba 29:45-51.
- FOURNIER, L.A. 1961. Características varietales del fruto de *Coffea arabica* L. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 78 p.
- FOURNIER, L.A. 1980. Fundamentos ecológicos del cultivo del café. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, PROMECAFE. 29 p. (Publicación Miscelánea no. 230).
- FOURNIER, L.A. 1981. Importancia de los sistemas agroforestales en Costa Rica. Agronomía Costarricense 5(1/2):141-147.
- FOURNIER, L.A. 1986. Bases ecológicas de la producción de café. La Fé, Ilama, Santa Bárbara, Honduras. Curso Sobre Ecofisiología del Cafeto, 10-14 de marzo de 1986. 44 p. (mimeografiado).
- FOURNIER, L.A.; HERRERA DE FOURNIER, M. E. 1983. Una década de observaciones fenológicas en café (*Coffea arabica* L.) en Ciudad Colón, Costa Rica. Revista de Biología Tropical 31:307-310.
- FRANCO, C.M. 1982a. Efeito de temperaturas supraóptimas no sistema radicular, no crescimento e na absorção e traslocação de nutrientes, em cafeiros cultivados em solução nutritiva. Turrialba 32:243-247.
- FRANCO, C.M. 1982b. Efeito da temperatura do solo e suas oscilações sobre o crescimento e o acúmulo de nutrientes nas partes aéreas do cafeiro. Turrialba 32:249-255.
- FRISCHKNECHT, P.M.; ELLER, B.M.; BAUMANN, T.W. 1982. Purine alkaloid formation and CO₂ gas exchange in dependence of development and of the environmental factors in leaves of *Coffea arabica* L. Planta 156:295-301.

- GLÄTTI, R.; ELLER, B.M.; WANNER, H. 1980. Temperaturabhängigkeit der Dunkelatmung und der Nettophotosynthese bei *Coffea arabica* L. Ber. Schweiz. Bot. Ges. 90:189-193.
- GONZALEZ, C. 1955. Café al sol o a la sombra. Suelo Tico 8:15-17.
- GONZALEZ, C. 1956. Café al sol o a la sombra. Suelo Tico 9:176-177.
- HEUVELDOP, J.; ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; ENRIQUEZ, G.; FÖLSTER, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. Turrialba 35:347-355.
- HUXLEY, P.A. 1967. The effects of artificial shading on some growth characteristics of Arabica and Robusta coffee seedlings. I. The effects of shading on dry weight, leaf area and derived growth data. J. App. Ecol. 4:291-308.
- JIMENEZ, H. 1983. Curso sobre el cultivo del café en Santa María de Dota. Noticiero del Café (Costa Rica) 19:1-3.
- JONES, M.B.; MANSFIELD, T.A. 1970. A circadian rhythm in the level of the carbon dioxide compensation point in *Bryophyllum* and *Coffea*. J. Exp. Bot. 21:159-163.
- KUMAR, D.; TIESZEN, L.L. 1980a. Photosynthesis in *Coffea arabica*. I. Effects of light and temperature. Exp. Agric. 16:13-19.
- KUMAR, D.; TIESZEN, L.L. 1980b. Photosynthesis in *Coffea arabica*. II. Effects of water stress. Exp. Agric. 16:21-27.
- LARCHER, W. 1984. Ökologie der Pflanzen. Stuttgart, Ulmer Verlag, UTB. 403 p.
- LOPEZ, M. DEL R. 1987. Ecología de la germinación y del crecimiento de la plántulas de tres especies del género *Erythrina*. Tesis Mag. Sc. San José, Universidad de Costa Rica. Escuela de Biología, 89 p.
- MAESTRI, M.; SANTOS-BARROS, R. 1977. Coffee. In Ecophysiology of tropical crops. Academic Press. p. 249-278.
- MONTEALEGRE, M. 1954. Cafetales a pleno sol, versus cafetales a la sombra. Suelo Tico 7:263-275.
- MONTEALEGRE, M. 1955. Cafetales a pleno sol, versus cafetales a la sombra. Suelo Tico 8:133-140.
- MONTEALEGRE, M. 1956. Cafetales a pleno sol, versus cafetales a la sombra. Suelo Tico 9:198-204.
- MONTOYA, L.A.; SYLVAIN, P.G. 1962. Aplicación de soluciones de azúcar en aspersiones foliares, para prevenir la caída del grano del café. Turrialba 12:100-101.
- MONTOYA, L.A.; SYLVAIN P.G.; UMAÑA, R. 1961. Effects of light intensity and nitrogen fertilization upon growth differentiation balance in *Coffea arabica* L. Coffee 3:97-108.
- NUNES, M.A.; BIERHUIZEN, J.F.; PLOEGMAN, C. 1968. Studies on the productivity of coffee. I. Effect of light, temperature and CO₂ concentration on photosynthesis of *Coffea arabica*. Acta Bot. Neerl. 17:93-102.
- NUNES, M.A.; BIERHUIZEN, J.F.; PLOEGMAN, C. 1969. Studies on the productivity of coffee. III. Differences in photosynthesis between four varieties of coffee. Acta Bot. Neerl. 18:420-424.
- NUTMAN, F.J. 1937a. Studies on the physiology of *Coffea arabica*. I. Photosynthesis of coffee leaves under natural conditions. Ann. Bot. 1:353-367.
- NUTMAN, F.J. 1937b. Studies on the physiology of *Coffea arabica*. II. Stomatal movement in relation to photosynthesis under natural conditions. Ann. Bot. 1:681-693.
- ÖBERBAUER, S.F. 1985. Plant water relations of selected species in wet and dry tropical lowland forests in Costa Rica. Revista de Biología Tropical 33:137-142.
- PEREZ, J.; GUTIERREZ, G. 1978. Respuesta de algunos cultivos y variedades de *Coffea arabica* L. a diferentes densidades de siembra. Agronomía Costarricense 2:61-68.
- PEREZ, V. 1977. Veinticinco años de investigación sistemática del cultivo del café en Costa Rica, 1950-1975. Agronomía Costarricense 1:169-185.
- RAMIREZ, J.E. 1986. El uso de la sombra en plantaciones de café en la zona de Pérez Zeledón. Noticiero del Café (Costa Rica) 1:1-3.
- RAMIREZ, J.E. 1987. El "die back" en el café. Noticiero del Café (Costa Rica) 2:1-2.
- ROJAS, O.E. 1987. Zonificación agroecológica para el cultivo del café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. San José, Costa Rica, IICA, PROMECAFE, AID-ROCAP-596-0090. 83 p.

- RUSSO, R. 1984. Efecto de la poda de *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook "Poro", sobre la producción de biomasa en un sistema agroforestal café-poró. In Congreso Agronómico Nacional (4., 1984, San José). Resúmenes. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agronomos. v. 1, p. 134-135.
- SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico; características y manejo. Trad. por E. Camacho. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 634 p.
- SUAREZ DE CASTRO, F. et al. 1961. Efecto del sombrero en los primeros años de vida de un cafetal. *Café* 3:81-102.
- SYLVAIN, P.G. 1955. The photosynthesis of *Coffea arabica* L. Turrialba, Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- TESHA, A.J.; KUMAR, D. 1977. Water movement in coffee seedlings: evaluation of various resistances. *Oecologia* 28:377-381.
- TUBELIS, A.; FOLONI, L.L.; NASCIMENTO, F.J.L. DO; VILLA NOVA, N.A. 1980. Temperatura do ar em cafezal. *Turrialba* 30:9-15.
- VALENCIA, A.G. 1973. Relación entre el índice de área foliar y la productividad del cafeto. *Cenicafé* 24:79-89.
- TOPP, W. 1981. *Biologie der Bodenorganismen*. Heidelberg, Quelle & Meyer. UTB. 224 p.
- ZIEGLER, H. 1983. *Physiologie*. In *Lehrbuch der Botanik*. Prod. fur D. von Denffer, H. Ziegler, F. Ehrendorfer und A. Bresinsky. Stuttgart, Gustav Fischer Verlag. p. 213-483.