

LA REDISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y LA LLUVIA DENTRO DE PLANTACIONES DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA* L.)

por

Álvaro Jaramillo-Robledo¹

Resumen

Jaramillo-Robledo, A. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 371-382. 2005. ISSN 0370-3908.

Se presenta una revisión de los estudios de microclima en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) a libre exposición solar y bajo diferentes sombríos para las condiciones de Colombia. Se describe la redistribución de la radiación solar, de los balances de energía, la temperatura de la planta y del cultivo. Se presentan resultados sobre los componentes del balance hidrológico y transporte de nutrimentos dentro de los cafetales.

Palabras clave: *Coffea arabica*, balance de radiación solar, balance de energía, balance hídrico, transporte de nutrimentos.

Abstract

The following review presents a series of studies on microclimate of non-shaded and shaded conditions of coffee plantations (*Coffea arabica* L.) in Colombia. Likewise, the re-distribution of solar radiation and the temperature, as well as the energy balance, of the coffee plant and the crop are described. The results on the components of water balance and transport of nutrients within the coffee plantations are reported.

Key words: *Coffea arabica*, solar radiation, energy balance, water balance, nutrients.

Introducción

El clima se puede estudiar en diferentes escalas del espacio y del tiempo y en general se consideran tres aproximaciones:

En una escala macroclimática, el clima se estudia en grandes áreas y está determinado por factores tales como la latitud, las corrientes marinas, la altitud, el relieve, las distancias desde el océano, grandes movimientos de masas de aire y otros. Como ejemplos se pueden citar la Zona

¹ Disciplina de Agroclimatología. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Chinchiná-Caldas-Colombia. Correo electrónico: alvaro.jaramillo@cafedecolombia.com

de Confluencia Intertropical, el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y los ciclones tropicales, pues todos ellos influyen en las condiciones climáticas y estacionales en áreas extensas de la Tierra.

En escala mesoclimática (Topoclimática), el clima se estudia en regiones más pequeñas y se hace énfasis en las condiciones fisiográficas de la región, por ejemplo, la altura sobre el nivel del mar, la pendiente del terreno, la proximidad a un valle o a una montaña, la orientación de las vertientes con respecto a la exposición solar o a la dirección de los vientos, las circulaciones de valle-montaña, los lagos, lagunas y embalses, la presencia de áreas boscosas o de desierto; estas características tienen incidencia en los climas regionales.

En escala microclimática se estudia la interacción de los mecanismos, los procesos y los estados que ocurren en el suelo, en la planta y en la atmósfera. Se refiere al clima de pequeñas áreas y está condicionado principalmente por la cobertura del terreno, clase de cultivo, distancias de siembra, arquitectura de la planta y sombrero. Entre las aplicaciones específicas de la microclimatología en la agricultura están la determinación de los perfiles de la velocidad del viento, temperatura, humedad atmosférica y dióxido de carbono dentro del cultivo; conocer los flujos de radiación solar y de energía dentro de las plantaciones; predecir la temperatura y la humedad en el suelo; estimar la evaporación y la evapotranspiración de las plantas; determinar la actividad fotosintética e intercambio del CO₂ entre la planta y la atmósfera; proteger a los cultivos de fuertes vientos y temperaturas extremas (Ayra, 1988).

Uno de los trabajos pioneros registrados sobre el microclima en los cafetales bajo las condiciones de Kenia, lo publicó Kirkpatrick (1935); allí se comparan las condiciones climáticas dentro de los cafetales con los registros de la estación climática externa. En Méjico, Barradas & Fanjul (1986), estudiaron las condiciones dentro de los cafetales bajo sombra y a libre exposición solar. En Colombia los primeros estudios se publicaron en 1951 para cafetales con sombrero de guamos y en ellos se analizaron las condiciones de radiación solar, temperatura del aire y del suelo, humedad relativa, viento y lluvia (Schroeder, 1951a, 1951b; Bonilla, 1952a, 1952b; Trojer, 1953, 1955). Estudios más recientes en cafetales a libre exposición solar relacionan los balances de radiación solar, balances de energía, balances hídricos y temperatura de la planta (Castillo *et al.*, 1996, 1997; Escobar & Jaramillo, 1983; Giraldo & Jaramillo, 2004; Gómez & Jaramillo, 1974; Jaramillo, 1976, 1986, 2003 ; Jaramillo & Cháves, 1998, 1999; Jaramillo & Escobar, 1984; Jaramillo & Gómez, 1989).

Se presenta una revisión de los estudios de microclima realizados por el Centro Nacional de Investigaciones de Café –Cenicafé, Federacafé– para las condiciones de Colombia; se describen las condiciones de clima dentro de diferentes agroecosistemas de cafetales con sombrero y a libre exposición solar; se hace énfasis en los balances de radiación solar, balances de energía, balances de agua y el transporte de nutrientes.

Balance de radiación solar

La disponibilidad de la radiación solar necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en un cultivo está determinada en primer término por el macroclima de la región (latitud y día del año), por las condiciones de nubosidad que determinan las cantidades de radiación directa y difusa, y por las propiedades del follaje como el tamaño y disposición de las hojas, estructura de la planta, distancia de siembra; estas características determinan cambios en los procesos de evaporación, calentamiento del aire y calentamiento del suelo.

El balance de radiación solar sobre una superficie se puede expresar de la siguiente manera (Jaramillo & Dos Santos, 1980):

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot (K_D\downarrow + K_d\downarrow) + (L\uparrow - L\downarrow)$$

En donde:

R_n radiación neta

K_D↓ radiación directa de onda corta (Longitud de onda desde 300 a 3000 nanómetros, nm) que entra a la superficie

K_d↓ radiación difusa de onda corta que entra a la superficie

L↑ radiación de onda larga (mayor de 3000 nm) emitida por la superficie

L↓ radiación de onda larga que llega a la superficie

α albedo, es la proporción de radiación de onda corta reflejada por la superficie

Dependiendo de las condiciones de nubosidad las proporciones de la radiación solar incidente (radiación solar observada / radiación solar astronómica) en la superficie terrestre varían en cada localidad. Para Colombia estas proporciones están entre un valor mínimo del 20% en Bahía Solano –Chocó– y un 68% en Uribia –Guajira (Tabla 1).

Tabla 1. Relación entre la radiación solar observada y la astronómica para algunas localidades de Colombia. (Simbaqueva *et al.*, 1986).

Localidad (Departamento)	Transmisividad, %
Bahía Solano (Chocó)	20
El Mira (Nariño)	23
Villarrica (Tolima)	23
Florencia (Caquetá)	33
Moniquirá (Boyacá)	35
Manizales (Caldas)	37
Tibaitatá (Cundinamarca)	38
Chinchiná (Caldas)	42
Palanquero (Cundinamarca)	45
Venecia (Antioquia)	47
Pueblo Bello (Cesar)	49
Cabo de La Vela (Guajira)	59
Manaure (Guajira)	64
Uribia (Guajira)	68

Una propiedad muy importante en el balance de radiación de los cultivos es el albedo, definido como la relación entre la radiación reflejada por una superficie y el total de la radiación incidente sobre la misma. El albedo varía con el tipo de superficie, la latitud, el ciclo estacional, estado nutricional de la planta y otros factores. Esta proporción de radiación no es utilizada dentro de los procesos de fotosíntesis y transpiración de las plantas. En la Tabla 2 se relacionan algunos valores de albedo para diferentes superficies. Un valor frecuente para la mayoría de los cultivos está entre el 10 y 20%.

Tabla 2. Albedo en varios tipos de superficies (Rosenberg, 1974, Sellers, 1974, Ayoade, 1983).

Superficie	Albedo %
Suelo negro	8-14
Bosque coníferas	5-15
Bosque tropical	15-20
Cultivos verdes	15-25
Desierto	25-30
Agua	5-10
Nieve	80-95
Hielo	50-70
Nube	36-90
La Tierra	30

Las mediciones de la radiación solar en cafetales se refieren a la radiación de onda corta y la radiación fotosintéticamente activa (Longitudes de onda entre 400 y 400 nm). No se han medido las cantidades de radiación de onda larga dentro de los agroecosistemas.

El balance de radiación solar en un cafetal a libre exposición solar indica que el 15% es reflejada por el cultivo(albedo), un 75 % es retenida por la planta y un 10% incide en la superficie del suelo. Las proporciones anteriores varían con el manejo del cultivo, las distancias de siembra, entre otras variables.

Los valores de albedo en *Coffea arabica* L, dependen de la elevación solar; a mayor elevación solar los valores son más bajos. Los valores encontrados para cafetales a libre exposición solar son semejantes a los medidos en otros cultivos como papa, pasto, caña de azúcar (Montieth, 1969) y los medidos en bosques, manzanos y cítricos (Jarvis *et al.*, 1976; Landsberg *et al.*, 1973; Proctor *et al.*, 1972; Stanhill, *et al.*, 1966) los cuales se varían entre el 10 y 20%.

La radiación solar dentro del árbol

Las comunidades vegetales presentan un sistema de capas sucesivas de hojas parcialmente superpuestas y sombreadas unas con otras. La luz incidente es absorbida progresivamente al pasar a través de las capas. Debido a la heterogeneidad de la arquitectura de la planta, el estudio de la transferencia de radiación solar dentro del follaje es difícil de explicar y por tal razón se tiende a considerar simplificaciones. Una generalización muy aceptada considera el follaje horizontal uniforme y establece que las características de su disposición foliar y de radiación no cambian dentro de las capas horizontales y solamente dependen del índice de área foliar.

Uno de los primeros modelos para explicar la radiación solar dentro de los cultivos fue el propuesto por Monsi y Saeki en 1960 (Saeki, 1993)

$$K\downarrow_n = (1-\alpha) \cdot K\downarrow \cdot e^{-k \cdot IAF}$$

En donde:

$K\downarrow_n$ radiación de onda corta incidente dentro de un nivel en el árbol.

α albedo para radiación de onda corta.

$K\downarrow$ radiación de onda corta incidente en la parte externa del árbol.

k Coeficiente de extinción o tasa de absorción de la radiación solar de onda corta por unidad de Índice de Área Foliar (IAF).

IAF Índice de área foliar (IAF= área de hojas/área de terreno).

En la Figura 1 se observa el comportamiento de la radiación solar dentro de un árbol de café.

La tasa de absorción de energía debida al follaje (coeficiente de extinción, k) tiende a ser mayor en especies de hoja ancha y relativamente horizontales (k entre 0,6 y 0,9) y a presentar menores valores en especies de hojas pequeñas y erectas (k entre 0,3 y 0,5).

En árboles de café de la variedad catuaí y para las condiciones de Brasil, **Jaramillo & Dos Santos** (1980), encontraron un valor para el coeficiente de extinción de 0,51. En observaciones realizadas en Chinchiná –Colombia–, **Castillo et al.** (1997), aplicaron el modelo de Monsi y Saeki para la Radiación Fotosintéticamente Activa (0,3 a 3.000 mm, RFA) estimando coeficientes de extinción (k), entre 0,41 y 0,60 para la radiación difusa y valores de 0,51 a 0,72 para la radiación directa.

La proporción de radiación solar retenida por los árboles de café variedad caturra es del orden de 75% para valores promedio diarios. Los valores de radiación interceptada por el árbol están modificados por la proporción de ramas y frutos presentes, por el grado de defoliación, el estado vegetativo, la edad de la planta, la disposición de hojas y ramas y la distancia de siembra. Para densidades de siembra de 10.000 plantas/ha de café variedad Colombia de 3,5 años de edad se encontró una interceptación del 97% (**Castillo et al.**, 1996, 1997).

La capa externa de hojas en un árbol de café absorbe la mayor proporción de la radiación solar incidente, por ejemplo en árboles de café de la variedad Borbón amarillo el primer estrato de hojas interceptó el 93% de la radiación incidente en la parte externa (**Jaramillo & Dos Santos**, 1980).

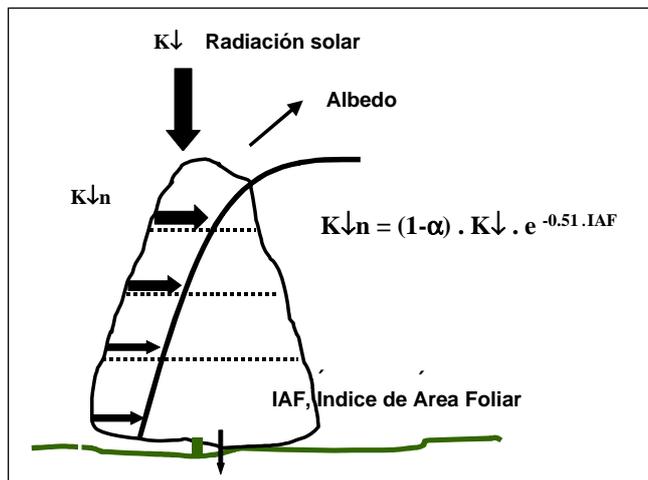


Figura 1. Variación de la radiación solar dentro de un árbol de café (**Jaramillo & Dos Santos**, 1980).

La proporción de radiación incidente en la superficie del suelo de una plantación de café con alta densidad de siembra y cobertura total sobre el terreno es muy baja, los valores medidos varían un 6 al 16% del total de la radiación incidente en la parte externa del cultivo.

Balance de energía

La radiación neta es la diferencia entre la radiación solar entrante y la saliente tanto de onda corta como de onda larga. Un balance de energía dentro del cultivo permite conocer de que manera las plantas o el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta en sus diferentes componentes.

Un balance de energía puede ser expresado así (**Rosenberg**, 1974):

$$R_n = H + \lambda E + G + P + M$$

- R_n radiación neta
- H flujo de calor sensible, utilizado en calentar el aire.
- λE flujo de calor latente empleado en evaporar el agua (λ , calor latente de evaporación, E, es la cantidad de agua evaporada)
- G flujo de calor en el suelo.
- P, M representa la fotosíntesis y otros intercambios de energía (actividad metabólica y almacenamiento de calor en los tejidos de la planta).

En medidas realizadas en Cenicafé (Latitud Norte 05°00', Longitud Oeste 75° 36', Altitud 1.310 m) dentro de cafetales de *Coffea arabica* L. variedad caturra, se observó como valor promedio que un 67% de la radiación neta se emplea en la evapotranspiración, un 30% en calentar el aire circundante y un 3% en calentar el suelo. En los ensayos no se incluyeron medidas de fotosíntesis. Los valores encontrados indican una situación de ambiente húmedo, sin limitaciones de agua en el suelo (**Jaramillo & Escobar**, 1984).

Según **Schubart & Salati** (1982), en ambientes húmedos donde el agua no limita la evapotranspiración, la mayoría de la radiación neta es usada para evaporar el agua. En las regiones desérticas con disponibilidad de agua limitada, la radiación se emplea en su mayor proporción en calentar el aire o el suelo. Los balances de energía realizados en la región amazónica en la estación cálida y húmeda indican que entre el 80 y 90% de la radiación solar se utiliza en el proceso de evapotranspiración.

La temperatura de la planta

Como una relación causal de los balances de radiación y de energía dentro del cultivo, se presentan diferencias de temperatura entre la planta y el aire circundante; éstas diferencias térmicas dentro de la plantación dependen en primer lugar de la cantidad de radiación incidente durante el día, de tal forma que las mayores diferencias ocurren en tiempo cálido y seco. En un día de alta nubosidad la temperatura de la planta y del aire tiende a igualarse. Otros factores que determinan estas diferencias dependen de la especie, de la morfología, fisiología y anatomía de la hoja, del grosor de la lámina foliar, de la tasa de transpiración e hidratación de la hoja.

Por ejemplo para *Coffea arabica* L., variedad caturra, las temperaturas en la superficie de la hoja observada hacia el amanecer y en las primeras horas del día son iguales o inferiores a la temperatura del aire en 1-2°C. Al aumentar la radiación solar, las hojas externas elevan su temperatura por encima a la del aire hasta en 10-12°C; las hojas sombreadas presentan temperaturas similares a las del aire próximo (Gómez & Jaramillo, 1974, Figura 2).

En el cafeto, las ramas siguen durante el día un comportamiento semejante al de las hojas pero se mantienen más calientes un mayor número de horas. Las ramas presentan temperaturas máximas más altas que las hojas y un

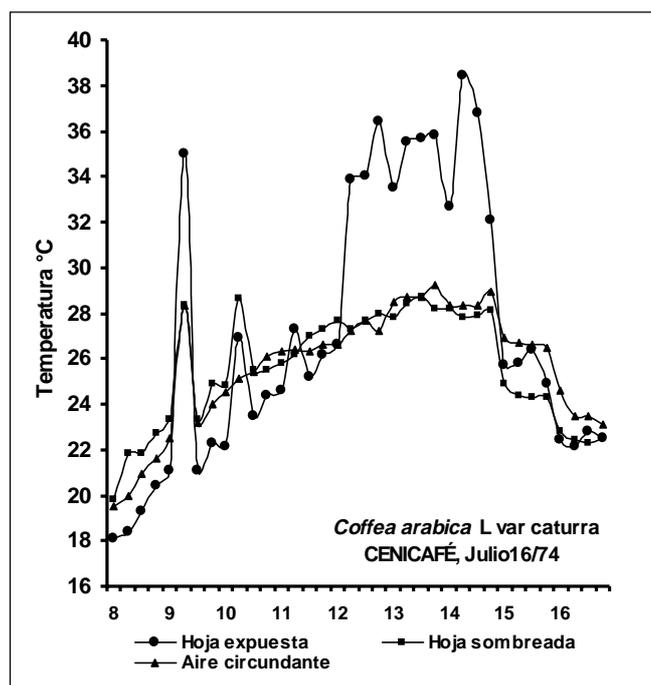


Figura 2. Temperatura de hojas de café *Coffea arabica* L. (Gómez & Jaramillo, 1974).

enfriamiento mas lento. Los frutos del cafeto siguen un comportamiento térmico similar al de las ramas.

El calentamiento y el enfriamiento de los diferentes órganos de la planta, aumentan o disminuyen la temperatura del aire adyacente; al comparar la temperatura del aire registrada dentro de un cafetal a libre exposición solar con la temperatura observada en la estación climática adyacente, se observa que en días de alto brillo solar se presentan diferencias hasta de 2°C. Durante la noche las diferencias están alrededor de 1°C. En días lluviosos o de alta nubosidad las diferencias son muy bajas o nulas (Jaramillo & Gómez, 1989).

Las diferencias entre la temperatura de la hoja y la del aire dependen de la especie de café y del contenido de humedad de la hoja, es así como en las de *Coffea canephora* con hojas de mayor tamaño y de mayor grosor las diferencias son mayores que en *Coffea arabica*, en la cual las hojas son relativamente más pequeñas y de menor grosor. Igualmente, al comparar plantas de las dos especies, las hojas de las plantas que no recibieron riego presentaron unas diferencias de temperatura mayores al compararlas con hojas de plantas que fueron regadas al suelo en forma continua (Figura 3) (Orozco & Jaramillo, 1978, Figura 3).

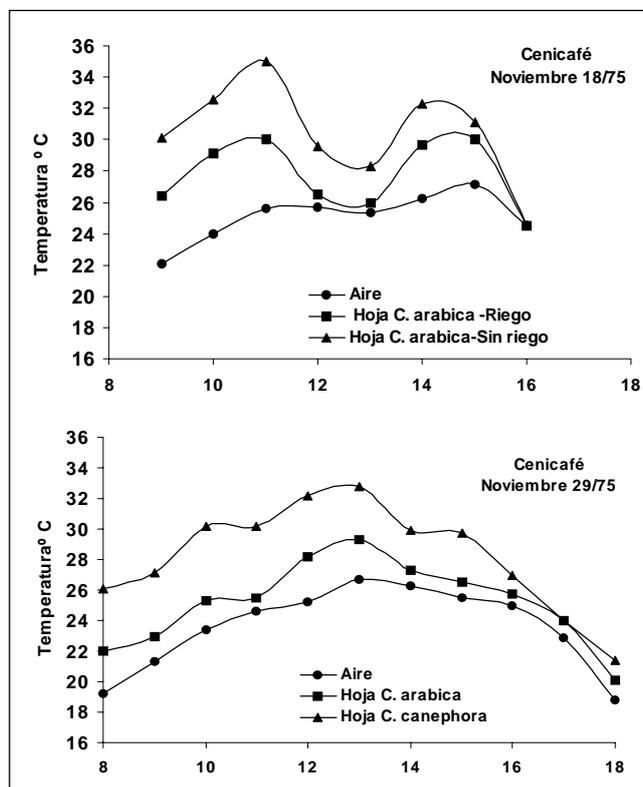


Figura 3. Temperatura de hojas de café *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (Orozco & Jaramillo, 1978).

Zahner (1968), atribuye estas diferencias a variaciones morfológicas, anatómicas y fisiológicas entre los tipos de hojas, tales como área foliar, grosor de la lámina, contenido de clorofila, cantidad de radiación recibida, tasas de transpiración y cantidad de agua en la hoja.

Las ramas del cafeto (*Coffea arabica* L.), siguen un comportamiento térmico semejante al de las hojas pero permanecen calientes más tiempo una vez disminuye la radiación solar; debido a una mayor masa las ramas presentan un enfriamiento más lento (**Gómez & Jaramillo**, 1974).

Las variaciones de la temperatura del aire en el interior de un cafetal bajo sombrero difieren con la altura sobre el nivel del suelo y las capas interiores permanecen más frías; las mayores diferencias se encuentran entre la superficie del suelo y un metro de altura; éstas diferencias son hasta de 4°C en las horas de mayor radiación. Entre 2 y 4 metros de altura las diferencias en temperatura son más pequeñas, con valores entre 1,0°C y 1,5°C (**Jaramillo**, 1976).

Balance hídrico

La parte aérea de la vegetación tiene la propiedad de actuar como barrera capaz de interceptar las precipitaciones, variando su efecto y distribución bajo el área de su cobertura. Una parte de la precipitación total en un ecosistema es retenida por las copas y tallos de los árboles (interceptación) y reintegrada a la atmósfera por evaporación. Del agua que alcanza la superficie del suelo ("Lluvia neta"), una fracción proviene del goteo de las hojas o pasa directamente a través de los espacios vacíos de la cobertura vegetal (precipitación directa); una pequeña cantidad de agua lluvia llega al suelo al escurrirse por la superficie de los tallos. De la lluvia neta, una parte se evapora directamente y otra proporción corre superficialmente por el suelo (escorrentía) y dentro del perfil del suelo parte es retenida como humedad de suelo y parte se mueve hacia capas más profundas (percolación). El agua también es absorbida por las raíces para salir posteriormente de la planta como vapor de agua a la atmósfera mediante el proceso de transpiración (**Hanchi & Rapp**, 1997).

Los resultados de balance hidrológico corresponden a mediciones diarias realizadas en las localidades de Cenicafé –Caldas (Latitud Norte: 05° 00' Longitud Oeste: 75° 36'. Altitud 1.310 m) Naranjal-Caldas (Latitud Norte: 04° 58' Longitud Oeste: 75° 39'. Altitud 1.381 m) y Paraguaicito –Quindío (Latitud Norte: 04° 24' Longitud Oeste: 75° 44'. Altitud 1203 m).

Variabilidad de la lluvia

Dentro de los agroecosistemas analizados se presenta una gran variabilidad de la lluvia debajo de los árboles de café; un valor promedio de 19.7% de las observaciones presentaron cantidades de lluvia superiores a la registrada en la parte externa de las parcelas; esta situación estaría indicando la proporción de la lluvia que es concentrada por la parte aérea del agroecosistema. Estos resultados se han encontrado en otros estudios realizados por **Raich** (1983), **Clarke** (1987) & **Bruijnzeel** (1990).

Evapotranspiración

En las condiciones climáticas de Cenicafé –Chinchiná– Colombia, **Suárez de Castro & Rodríguez** (1957), para observaciones diarias realizadas con lisímetros monolíticos, demuestran que la máxima evapotranspiración real se presenta cuando el suelo estaba cubierto con cobertura viva de añil rastrero (*Indigofera indica*), con un valor de 37% del volumen de la lluvia incidente; un valor del 20% se registró para un suelo sin cobertura y un menor valor del 11% se observó cuando el suelo tenía cobertura de hojarasca de guamo (*Inga* sp.). Las medidas anteriores demuestran que la mejor economía del agua en regiones secas o con períodos de deficiencia de agua acentuados se logra con un suelo con cobertura vegetal en descomposición, que puede lograrse cortando las arvenses al inicio del período seco.

Almacenamiento de agua en la parte aérea

La vegetación ejerce un efecto significativo sobre la cantidad de agua que llega al suelo, debido a la interceptación en el follaje de la lluvia incidente. El valor de almacenamiento es la cantidad de agua que permanece en la parte aérea del agroecosistema después de parar el goteo a la superficie del suelo. El almacenamiento de la lluvia por el agroecosistema está relacionado con las características morfológicas del cultivo y el índice de área foliar.

El almacenamiento de agua de la parte aérea para los agroecosistemas de cafetales analizados a partir de la lluvia diaria registró un valor medio de 0,83 mm/día con valores que varían entre 0,33 mm/día para un cafetal a libre exposición y 1,77 mm/día para un cafetal con guamo a 6m x 6m (Figura 4); estos valores dependen especialmente del porcentaje de cobertura vegetal; todos los valores observados están dentro de los medidos en otras condiciones y regiones del mundo con el uso del método de **Rutter** (1975), los cuales para los bosques tropicales están próximos a 1,7 mm/día (**Landsberg & Gower**, 1997).

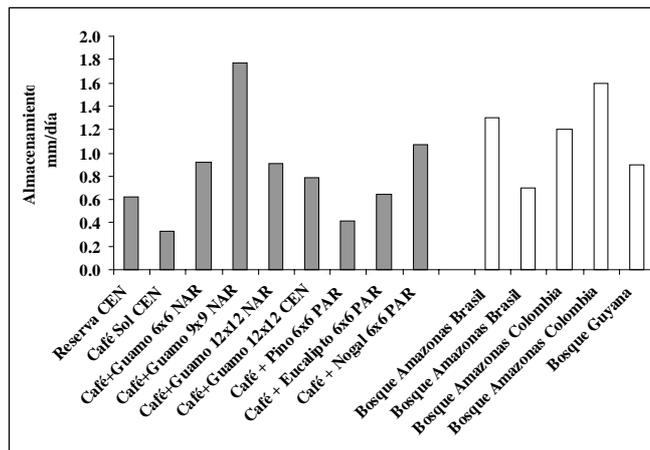


Figura 4. Almacenamiento de agua en la parte aérea en diferentes agroecosistemas de cafetales. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

Interceptación

Para un bosque y para cafetales a libre exposición solar y bajos diferentes sombríos, la mayor proporción de la lluvia externa diaria que ingresa al sistema, es retenida por la parte aérea de la planta, con valores de interceptación del 56%; solamente un 44% de la lluvia llega a la superficie del suelo como lluvia neta, un 38% se infiltra en el perfil del suelo y un 6% es de escorrentía (Jaramillo, 2003). Los altos valores de la interceptación de la lluvia encontrados se explicarían por la alta densidad de siembra de los cafetos sumada al efecto de los árboles de sombrío. En el caso de los cafetales bajo sombra la interceptación se debe a la suma de la lluvia retenida por la sombra y de la captada por los cafetos. Los valores encontrados en este estudio están dentro de los rangos hallados por otros autores (Clarke, 1987, Bruijnzeel, 1990) en bosques húmedos para las condiciones tropicales de Brasil, Nigeria, Tailandia y Puerto Rico, en los cuales los valores de interceptación varían entre 3% y 63% respectivamente. Las variaciones anteriores reflejan diferentes condiciones climáticas, distintas intensidades de la lluvia y gran diversidad en la estructura del bosque.

Escurrimiento por los tallos

En relación con el escurrimiento de agua por los tallos, en Cenicafé se han realizado medidas en árboles de guamo (*Inga sp*) encontrándose una proporción muy baja del total de la lluvia externa; el valor máximo medio fue de 1,3%. Relaciones de esta magnitud en el flujo por el tallo concuerdan con los hallados en diversos estudios dentro de bosques (Raich, 1983; Lloyd & Marques, 1988; Hanchi & Rapp, 1997; Li *et al.*, 1997; Tobón *et al.*, 2000).

Lluvia neta

Dentro de los agroecosistemas de café las cantidades de lluvia neta diaria que ingresan al suelo, disponibles para el uso del cafeto, presentan proporciones más bajas, con un valor medio de 48% y valores extremos de 40% para cafetal con nogal y 59% para cafetal con guamo a 6m x 6m (Figura 5). La situación anterior es explicable por la presencia de dos niveles de interceptación de la lluvia, el primer estrato constituido por la copa de los árboles de sombrío y el segundo por un cafetal de alta densidad y con una cobertura continua. Las proporciones de lluvia neta registradas en la mayoría de las publicaciones presentan valores superiores al 80%, como es el caso de mediciones en la selva amazónica de Colombia y Brasil (Veneklaas, 1990, Mabblerley, 1992; Tobón *et al.*, 2000).

Para regiones con condiciones de alta precipitación durante el año, estos sistemas no tendrían limitación en cuanto a la disponibilidad de agua para los cafetos; sin embargo, las densidades de siembra del sombrío y del cafeto deben ser tenidas en cuenta en aquellas regiones con períodos de deficiencia prolongados (3-4 meses) o con bajas cantidades de lluvia anual, debido a que el cafetal dispondría de una baja proporción de lluvia neta, especialmente durante los años de incidencia de El Niño, como lo relacionan Poveda & Jaramillo (2000), Poveda *et al.* (2001, 2002).

Escorrentía

La escorrentía es la cantidad de lluvia neta que se mueve sobre la superficie del suelo. La escorrentía se midió en predios con un área de captación de 12.0 m² delimitados

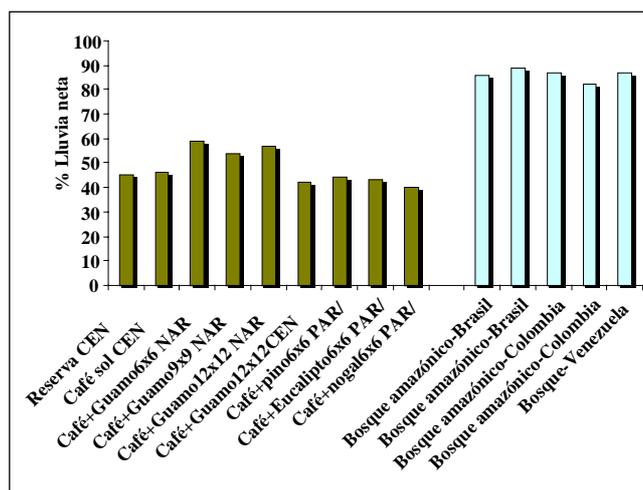


Figura 5. Proporción de lluvia neta diaria en los diferentes agroecosistemas de cafetal. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

lateralmente por paredes de geomembrana y el agua recolectada se recogió en recipientes calibrados para el área de captación. Las medidas se realizaron diariamente.

Para los agroecosistemas analizados la escorrentía presentó un valor promedio de 9,4% con un valor máximo de 15,6% en el cafetal a libre exposición solar y un valor mínimo de 4,0% en el cafetal con sombrío de guamo a 12m x 12m y en la reserva de bosque de Cenicafé con un 5,6% (Figura 6). En los resultados anteriores se ve clara la influencia de la interceptación del follaje la cual disminuye la lluvia neta que ingresa al suelo; además los porcentajes de agua que ingresan al perfil del suelo son altos en los suelos donde se realizaron las mediciones.

Percolación

La percolación se refiere a la proporción de lluvia neta que ingresa al perfil del suelo y drena para suplir las aguas subterráneas. La percolación se estimó diariamente como la diferencia de la lluvia neta menos el agua de escorrentía.

Para diferentes unidades de suelos de origen volcánico en donde se realizaron las mediciones (Cenicafé, Naranjal- Chinchiná - Caldas y Paraguaicito- Buenavista-Quindío). Los suelos anteriores son de textura Franco-Franco-Limoso y Franco-arenosos, con buena aireación, buen drenaje, alto contenido de materia orgánica y alta capacidad de retención de humedad.

Las proporciones de la lluvia percolada se consideran altas, con un valor medio de 46,8% y valores extremos de 31,5% para cafetal a libre exposición en Paraguaicito-Quindío y 72,4% en un agroecosistema de café mas guamo a 12m x 12m.(Figura 7). Para los suelos de origen volcá-

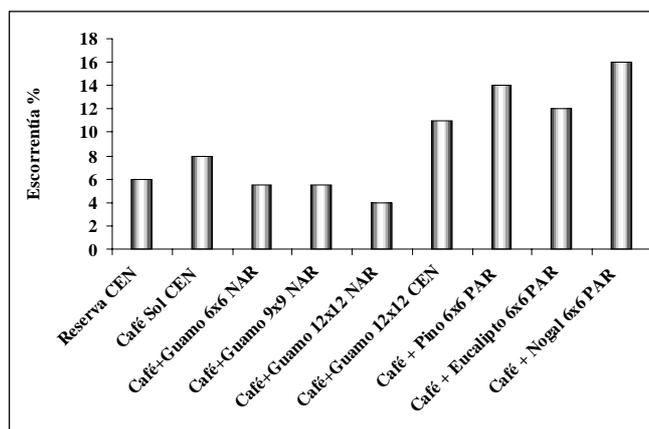


Figura 6. Proporción de escorrentía para diferentes agroecosistemas de cafetal. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

nico este valor representa una alta proporción y debe tenerse en cuenta por su papel en el transporte de nutrientes hacia estratos más profundos.

Humedad del suelo

La cobertura vegetal, la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, y otros factores influyen en la dinámica del agua en el suelo.

Los registros de humedad volumétrica del suelo en cafetales a libre exposición solar y bajo sombríos se han realizado mediante técnicas de reflectometría (Time Domain Reflectometry, TDR). En los estudios de **Poveda & Jaramillo (2000)** y **Poveda et al. (2001)**, se demuestra que bajo una cobertura vegetal de café a la sombra, los cambios en la humedad del suelo debidos a la variabilidad de las condiciones climáticas, son menos drásticos que en un cafetal a libre exposición solar (Figura 8);

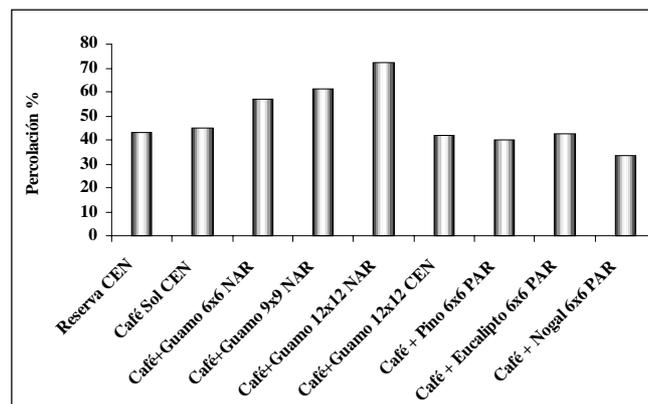


Figura 7. Proporción de percolación en diferentes agroecosistemas de cafetal. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

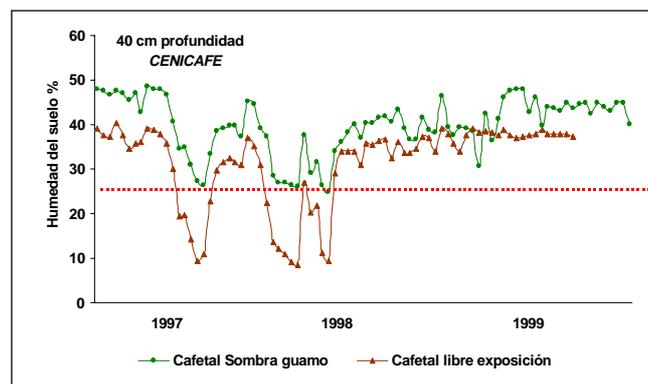


Figura 8. Variación decadal de la humedad volumétrica del suelo durante el ENSO 1997-1998. (Poveda & Jaramillo, 2000 y Poveda et al., 2001).

lo que trae consecuencias importantes con respecto a las condiciones de disponibilidad de agua que propicia la presencia del bioma circundante y de los flujos superficiales hacia la atmósfera. Las deficiencias de humedad en el suelo se acentúan con la ocurrencia del Fenómeno de El Niño (por ejemplo 1997-1998), período en el cual se disminuye la cantidad de lluvia en la región Andina de Colombia.

Transporte de los nutrientes en los componentes del balance hídrico

Los movimientos de los elementos químicos en los ecosistemas se pueden clasificar en tres tipos: *ciclos geoquímicos*, cuando los intercambios se realizan entre los ecosistemas; *ciclos biogeoquímicos* cuando se realizan dentro de los ecosistemas y *ciclos bioquímicos* cuando la redistribución de los elementos ocurre dentro de organismos individuales.

La salida de nutrientes de las plantas se presenta de varias maneras: 1- por lavado desde los diferentes órganos por la lluvia o el suelo. 2- por defoliación de los herbívoros, incluyendo la remoción física de la biomasa, la aceleración del lavado por daño del follaje. 3- por salidas asociadas a la reproducción y 4- por caída de hojas, ramas, corteza del tallo. 5- por tala y quema de la vegetación. Los ciclos de nutrientes en los bosques y en general las áreas con vegetación incluyen un conjunto complejo de mecanismos de retroalimentación directos entre el suelo y las plantas.

La dinámica de los nutrientes asociados con la redistribución de la lluvia se ha estudiado en diferentes ecosistemas de bosques y de cultivos (Edwards, 1982;

Imbach, *et al.*, 1989; Golley, 1991; Likens & Bormann, 1995; Cavalier, *et al.*, 1997; Li, *et al.*, 1997).

Las cantidades promedio de nutrientes en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, en el agua de lavado foliar en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes árboles de sombrío, provenientes de muestreos mensuales, se presentan en la Tabla 3. El pH se midió mediante el método potenciométrico y los elementos por espectrofotometría de absorción atómica.

El promedio de las cantidades de nutrientes que ingresan al suelo en el agua de lavado foliar en los ecosistemas analizados presentan los siguientes valores ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$): potasio 85,4, calcio 41,1, magnesio 12,0, nitratos 21,9. El potasio es un elemento que incrementó su cantidad al pasar por la parte aérea en todos los ecosistemas analizados (anotados con +); las cantidades de potasio, calcio y magnesio son superiores a las observadas en las entradas de agua lluvia en los ecosistemas de bosque y en el cafetal con sombrío de nogal. Las cantidades de nutrientes en el agua de lavado foliar son comparables con las citadas por Veneklaas (1990) en bosques tropicales de Puerto Rico, Jamaica, Nueva Guinea, Venezuela, y en dos altitudes en Santa Rosa de Cabal-Risaralda-Colombia con los siguientes valores promedio ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$): potasio 79,0, calcio 20,6 y magnesio 9,0. Los valores obtenidos durante las observaciones del estudio también son comparables con los hallados en estudios realizados en Costa Rica, Nueva Guinea y Venezuela (Eaton, *et al.*, 1973; De Las Salas & García, 2000; Tobón *et al.*, 2000). El agua de lavado foliar presentó un valor medio de pH de 6,6 para los ecosistemas en estudio; los valores más bajos en el pH se presentan para la asociación del café con el eucalipto y el pino, con un pH de 6,3 y 6,4 respectivamente.

Tabla 3. Cantidades promedio de nutrientes en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, en el agua de lavado foliar en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes árboles de sombrío.

Cobertura	Potasio	Calcio	Magnesio	Nitratos	pH
Café sol –CEN-	70,4 +	63,8 -	16,1 -	13,3 -	6,6 -
Café sol –PAR-	70,2 +	15,8 -	5,9 -	27,5 -	6,5 -
Café + guamo	120,0 +	71,4 -	15,4 -	14,7 -	6,8 +
Café + nogal	99,1 +	28,0 +	11,3 +	39,4 +	6,6 -
Café + pino	49,4 +	8,7 -	2,9 -	25,9 -	6,4 -
Café + eucalipto	49,4 +	14,1 -	5,2 -	14,3 -	6,3 -
Bosque	127,4 +	85,8 +	27,0 +	18,1 -	6,8 +
Media	85,4	41,1	12,0	21,9	6,6
Lluvia-PAR	9,9	27,9	8,6	36,0	6,7
Lluvia-CEN	13,3	75,0	19,5	32,5	6,7

(+) (-) Cantidad del nutriente, mayor o menor a la registrada en el agua lluvia que ingresa al agroecosistema. PAR, Paraguaicito-Quindío. CEN, Cenicafe-Caldas.

Tabla 4. Cantidades de nutrimentos en kg.ha⁻¹.año⁻¹, en el agua de escorrentía en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes árboles de sombrío.

Cobertura	Potasio	Calcio	Magnesio	Nitratos	pH
Café sol (CEN)	8,0	9,8	2,4	1,9	6,8
Café sol (PAR)	7,5	2,7	0,6	3,3	6,1
Café + guamo	15,1	13,0	2,6	4,0	6,7
Café + nogal	13,5	7,6	2,7	3,9	6,7
Café + pino	7,3	2,8	0,5	4,0	6,1
Café + eucalipto	8,1	2,3	0,5	2,2	6,1
Bosque	17,4	5,4	8,5	3,5	6,8
Media	11,0	6,2	2,5	3,3	6,6

Las cantidades de nutrimentos que se movilizan en el agua de escorrentía se presentan en la Tabla 4, en la cual se observan como valores promedio 11,0 kg.ha⁻¹.año⁻¹ para potasio, 6,2 para calcio, 2,5 para magnesio y 3,3 para nitratos, estas cantidades son inferiores a las registradas en el agua de lavado foliar, situación explicable por los menores volúmenes de escorrentía registrados en los ecosistemas en estudio.

Los resultados muestran que las cantidades de potasio aumentan en el agua de lavado foliar en todos los agroecosistemas estudiados cuando se comparan con las cantidades aportadas inicialmente por el agua lluvia, lo cual concuerda con lo expresado por **Golley** (1991), quien en diferentes estudios encontró que el potasio se presenta en concentraciones hasta 10 veces mayores que la registrada en el agua lluvia que ingresa al ecosistema. En el presente estudio el potasio presentó un valor medio máximo 9,6 veces superior al registrado en el agua lluvia. El potasio es un elemento importante en los procesos estomáticos de la planta y por lo tanto en el intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono, el cual es exudado a la superficie de la hoja y lavado fácilmente por el agua lluvia. Para otros elementos como el calcio el aumento en el agua de lavado foliar en relación con la lluvia externa fue 1,5 veces mayor y para el magnesio 1,4 veces mayor.

En los resultados obtenidos se observan variaciones en las cantidades de los elementos químicos entre los diferentes sombríos, confirmando lo expresado por **Beer et al.** (1998) quienes manifiestan que muchos de los aspectos en el ciclo de los nutrientes son directamente afectados al escoger las especies de sombríos ya que las especies difieren significativamente en la composición de la biomasa.

Conclusiones

Los ecosistemas son influidos por los factores físicos, químicos y biológicos del medio ambiente; entre los factores físicos están la radiación solar que determina la cantidad de biomasa acumulada, la temperatura que condiciona la tasa de acumulación de ésta y la disponibilidad de agua necesaria para todos los procesos biológicos.

Los cafetales a libre exposición solar o con sombrío modifican en su interior los componentes de la radiación solar, del agua y de los nutrientes que ingresan externamente al agroecosistema, transformación que se puede determinar al analizar cada uno de los componentes de los balances de radiación, de energía, hidrológico y de nutrimentos. El conocimiento de la dinámica de los diferentes flujos, como el expuesto en el presente estudio, ayuda al entendimiento del clima al nivel de macroescala y contribuye a orientar el manejo de los cafetales buscando su sostenibilidad ambiental y su productividad, especialmente en regiones con limitaciones de radiación solar y de agua o cuando se presentan períodos críticos para el cultivo por deficiencia o exceso de agua durante eventos climáticos como El Niño y La Niña.

Para entender la magnitud de los cambios en el clima local y regional debidos a la intervención del hombre hay necesidad de profundizar en los estudios microclimáticos y mesoclimáticos de los ecosistemas de la región Andina Tropical con énfasis en las grandes variaciones que ocurren altitudinalmente dentro de las cuencas hidrográficas.

Bibliografía

Ayoade, J. O., 1983. Introduction to climatology for the tropics. Chichester, John Wiley and Sons. 258p.

- Ayra, S. P.**, 1988. Introduction to micrometeorology. Academy Press, Inc. San Diego, Ca. 307p.
- Barradas, V.L. & L. Fanjul**, 1986. Microclimate characterization of shade and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* **38**(1-3): 101-112.
- Beer J., Muschler, D., Kass D. & E. Somarrriba**, 1998. Shade management in coffee and cacao plantation. *Agroforestry Systems* **38**: 139-164.
- Bonilla, E.**, 1952a. Estudio comparativo de la distribución de la luz y el viento en dos regiones cafeteras (Caldas y Antioquia). *Cenicafé* **3**(25): 29-35.
- _____. 1952b. Estudio de la distribución vertical de la humedad relativa, de la temperatura del aire y del suelo, en una plantación de café. *Boletín Informativo de Cenicafé* **3**(34): 19-37.
- Bruijnzeel, L.A.**, 1990. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion; a state of knowledge review. Amsterdam. Unesco International Hydrological Programme-Free University Amsterdam. 224p.
- Castillo, E., Arcila, J., Jaramillo, A. & J. Sanabria**, 1996. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en *Coffea arabica* L. variedad Colombia. *Cenicafé* **47**(1): 5-15.
- _____, 1997. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica* L. *Cenicafé* **48**(3): 182-194.
- Cavalier, J., Jaramillo, M., Solis, D. & D. Leon de.**, 1997. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hidrology* **193**(1-4): 83-96.
- Clarke, T.**, 1987. The interception process in tropical rain forest: A literature review critique. *Acta Amazonica* **16**-17: 225-238.
- De Las Salas & G., García, C.**, 2000. Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Santa Fe de Bogotá. **XXIV**(91): 205-218.
- Eaton, J. S., Likens, G. E. & F. H. Bormann**, 1973. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. *The Journal of Ecology* **61**(2): 495-508.
- Edwards, P. J.**, 1982. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. V. Rates of cycling in throughfall and litter fall. *Journal of Ecology* **70**: 807-827.
- Escobar, E. & A. Jaramillo**, 1983. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. *Cenicafé* **34**(3): 98-106.
- Giraldo, J. F. & A. Jaramillo**, 2004. Aspectos hidrológicos y de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo (*Inga* sp) *Cenicafé* **55**(1): 52-78.
- Golley, F.B.**, 1991. Nutrient cycling and nutrient conservation. In: Tropical rain forest ecosystems; structure and function. Ecosystem of the world 14A. Elsevier Scientific Publishing Company. pp. 137-156.
- Gómez, L. & A. Jaramillo**, 1974. Temperatura de árboles de café al sol. *Cenicafé* **25**(2): 61-62.
- Hanchi, A. & M. Rapp.**, 1997. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam. **97**: 231-235.
- Imbach, A. C., Fassbender, H. W., Beer, J., Borel, R. & A. Bonnmann**, 1989. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erithrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. VI. Balances hídricos e ingreso con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. *Turrialba* **39**(3): 400-414.
- Jaramillo, A.**, 1976. Condiciones micrometeorológicas en un cafetal bajo sombrero. *Cenicafé* **27**(4): 180-184.
- _____. 1986. Flujos de radiación solar y de energía en cafetales. *Atmósfera* **11**: 3-24.
- _____. 2003. La lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. *Cenicafé* **54**(2): 134-144.
- _____ & **A. B. Chaves**, 1998. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. *Cenicafé* **49**(2): 129-135.
- _____ & **A. B. Chaves**, 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café- *Coffea arabica* L.- al sol y bajo sombra. *Cenicafé* **50**(2): 5-13.
- _____ & **J. M. Dos Santos**, 1980. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. variedades catuaí y borbón amarillo. *Cenicafé* **31**: 86-104.
- _____ & **E. Escobar**, 1984. Balance de energía en *Coffea arabica* L. *Cenicafé* **34**(4): 115-126.
- _____ & **L. Gómez**, 1989. Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrero. *Cenicafé* **40**(3): 65-79.
- Jarvis, P. G., James, G. B. & J. J. Landsberg**, 1976. Coniferous forest. In: Montieith, J. L. (Editor). *Vegetation and the atmosphere*. London. Academy Press. Vol 2: 171-240.
- Kirkpatrick, T. W.** 1935. Studies on the ecology of coffee plantations in east Africa. I: The climate and eco-climate of coffee plantations. Amani (Tanganyka). East African Agricultural Research Station. 90p.
- Landsberg, J. J., Jarvis, P. G. & M. B. Slater**, 1973. The radiation regime of a spruce forest. In: Slayter, R. O. (Editor). *Plant response to climate factors*. Paris. UNESCO. pp. 411-418.
- _____ & **S. T. Gower**, 1997. Applications of physiological ecology to forest management. San Diego, Academy Press. 354 p.
- Li, Y.C., Alva, A. K., Calvert, D.V. & M. Zhang, M.**, 1997. Chemical composition of throughfall and stemflow from citrus canopies. *Journal of Plant Nutrition* **20**(10): 1351-1360.
- Likens, G. E. & F. H. Bormann**, 1995. Biogeochemistry of a forested ecosystem. Springer-Verlag. New York. 159p.
- Lloyd, C. R. & A. de O. Marques**, 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* **42**(1): 63-73.
- Mabberley, D. J.**, 1992. Tropical rain forest ecology. Blackie Academy and professional. London. 300p.

- Montieth, J. L.**, 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. In: Eastin, J. D. et al (Editors). *Physiological aspects in crop yield*. Madison, USA. American Society of Agronomy. pp. 89-111.
- Orozco, F. J. & A. Jaramillo**, 1978. Efecto del déficit de humedad en el suelo sobre la temperatura del suelo y de las hojas en plantas de *Coffea canephora* y *C. arabica*. *Cenicafé* **29**(4): 121-134.
- Poveda, J. G. & R. A. Jaramillo**, 2000. ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia, *BAHC News(USA)* N° 8: 3-6.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N. & R. Mantilla**, 2001. Seasonality in ENSO – related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research* **37**(8): 2169-2178.
- _____, **Ramírez, J. M. & A. Jaramillo**, 2002. Un modelo estocástico para la humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera de Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos* 9: 47-56.
- Proctor J. T. A., Kyle W. J. & J. A. Davies**. 1972. The radiation balance of an apple tree. *Canadian Journal of Botany*. **50**(5): 1731-1740.
- Raich, J. W.**, 1983. Throughfall and stemflow in mature and year-old wet tropical forest. *Tropical Ecology* **24**(2): 234-243.
- Rosenberg, N. J.**, 1974. *Microclimate: The biological environment*. New York, McGraw-Hill Book. 315p.
- Rutter, A. J.**, 1975. The Hydrological cycle in vegetation and the atmosphere. Vol I. Principles. New York. Academy Press. pp. 11-154.
- Saeki, T.**, 1993. Light relations in plant communities. In: Evans L.(Editor). *Environmental control of plant growth*. New York, Academy Press. pp. 70-94.
- Schroeder, R.**, 1951a. Distribución de la temperatura en una plantación de café. *Cenicafé* **2**(23): 21-30.
- _____. 1951b. Resultados obtenidos de una investigación de microclima en un cafetal. *Cenicafé* **2**(18): 33-43.
- Schubart, H. O. R & E. Salati**, 1982. Natural resources for land use in the Amazonia region: The natural systems. In: Hecht, B. (Ed). *Amazonia, Agriculture and Land Research*. Cali-Colombia. CIAT. pp. 211-239.
- Sellers, W. D.**, 1974. *Physical climatology*. The University of Chicago Press. Chicago. 271p.
- Simbaqueva, O., Bastos, L. C. & M. G. Hurtado**, 1986. Estudio de la radiación solar en Colombia. Bogotá. HIMAT – IAN. 113 p.
- Stanhill, G., Hofstede, G. J. & J. D. Kalma**, 1966. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society* **92**(391): 128-140.
- Suárez de Castro, F. & A. Rodríguez**, 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Bogotá. 473 p.
- Tobón, C., Bouten, W. & J. Sevink**, 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology, Amsterdam* **237**: 40-57.
- Trojer, H.**, 1953. Distribución horizontal de luminosidad en un cafetal y en almácigos. *Cenicafé* **4**(45): 20-32.
- _____. 1955. Distribución y características de la precipitación en un cafetal bajo sombrío. *Cenicafé* **6**(67): 256-264.
- Veneklaas, E.**, 1990. Rainfall interception and aboveground nutrient fluxes in Colombian, montane tropical rain forest. Utrecht, University of Utrech. 105p.
- Zahner, R.**, 1968. Water deficits and growth of trees. In: Kozlowski, T.T. (Editor). *Water deficits and plant growth*. New York. Academy Press. Vol. **2**: 191-254.

Recibido el 19 de noviembre de 2004.

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005.