

# CICLO HIDROLÓGICO Y TRANSPORTE DE NUTRIMENTOS EN CAFETALES BAJO DIFERENTES DENSIDADES DE SOMBRÍO DE GUAMO<sup>1</sup>

José Fernando Giraldo-Jiménez\*; Alvaro Jaramillo-Robledo\*\*

---

## RESUMEN

**GIRALDO J., J.F.; JARAMILLO R., A. Ciclo hidrológico y transporte de nutrientes en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo. Cenicafé 55(1):52-68.2004.**

En un sistema agroforestal de *Coffea arabica* L. con sombrío de *Inga edulis*, se evaluaron el ciclo hidrológico y el transporte de nutrientes en el agua de lluvia. El estudio se desarrolló en cafetales establecidos con sombrío en tres distancias de siembra y dos niveles de fertilización. Se encontraron relaciones lineales entre la lluvia efectiva y la percolación con respecto a la lluvia externa. No hubo relación entre la escorrentía y la lluvia externa. Aunque sin tendencia definida, la interceptación presentó menos dispersión que la escorrentía. La distancia de siembra no afectó los componentes del ciclo, excepto la humedad del suelo. La percolación calculada difiere de la medida en el campo. En cada parcela hubo gran variabilidad de la lluvia efectiva. De la lluvia externa, la vegetación retuvo 15%, y del 85% que llegó al suelo, 5% se perdió como escorrentía y 65% ingresó como percolación. Si bien, el transporte de nutrientes en el agua no se vio afectado por la distancia de siembra se observó relación entre el nivel de fertilización y las cantidades de nutrientes en el agua. Se destacaron las cantidades de potasio en el lavado foliar (181kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), y las de calcio en la percolación (199kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

**Palabras Claves:** Balance hídrico, ciclo hidrológico, *Coffea arabica*, escorrentía, humedad del suelo, *Inga edulis*, interceptación, lisímetros, lluvia, percolación.

---

## ABSTRACT

The hydrologic cycle and nutrients translocation occurring through rainfall were evaluated in an agro-forestal system composed by *Coffea arabica* and *Inga edulis*. The study was developed in coffee crops established with shades in three sowing distances and two fertilization levels. Linear-like relationships were found between both dependent variables: net effective rainfall and percolation related to gross rainfall. There were no clear relationships between runoff and gross precipitation. Although there was not a defined tendency, the interception showed a less disperse pattern than the runoff. Except for the soil moisture, the sowing distances of the shade trees did not affect the hydrologic cycle components. The calculated values for percolation were different from those obtained in field by lysimeter measurements. High variability was found between data collected at individual points for each pluviometric network placed in every plot. The canopy retained 15% of the gross precipitation, and from the 85% of net rainfall that reached the soil 5% was lost in the form of runoff and 65% entered as percolation. Although the sowing distance of the shade trees did not affect the nutrients translocation in the hydrologic cycle components, there existed a direct relation between the fertilization level and the nutrients quantities (kg ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>) transported by the different water fractions. High potassium quantities were remarkable in the foliage washing water reaching values of 181kg ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup> as well as high calcium quantities in the percolated water with values of 199kg ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>.

**Keywords:** *Coffea arabica*, hydrologic cycle, *Inga edulis*, interception, lysimeter, percolation, rainfall, runoff, soil moisture, water budget.

---

<sup>1</sup> Fragmento de tesis presentada por el primer autor a la Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, como requisito para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

\* Ingeniero Agrónomo. Universidad de Caldas. Manizales, Caldas, Colombia.

\*\* Investigador Científico II. Agroclimatología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

**Ciclo hidrológico.** La parte aérea de la vegetación tiene la propiedad de actuar como barrera capaz de interceptar las precipitaciones, influyendo en su efecto y distribución bajo el área de cobertura (29). Una parte de la precipitación total en un ecosistema es retenida por las copas y troncos de los árboles (intercepción del dosel), y es reintegrada a la atmósfera mediante la evaporación. Del agua que alcanza la superficie del suelo una fracción proviene del goteo de las hojas o directamente a través del dosel (precipitación directa); el resto llega al suelo cayendo por la superficie de los troncos (escurrimiento fustal) (14, 17, 41). De la lluvia efectiva (aquella que alcanza la superficie del suelo), una parte se evapora, una proporción corre superficialmente (escorrentía), otra es retenida por el suelo (humedad del suelo) o pasa a través del perfil del suelo (percolación) (20).

El agua también puede ser absorbida por las raíces y salir posteriormente de la planta por transpiración (19). En términos generales, las modificaciones en las proporciones de agua interceptada por la vegetación originan cambios en las relaciones en el balance hídrico, especialmente en los volúmenes del agua de escorrentía, de infiltración y en la cantidad almacenada en el suelo (23).

Estudios previos acerca de la redistribución del agua de lluvia en ecosistemas con diferentes cubiertas vegetales y bajo diversas condiciones ambientales han demostrado la influencia que tienen los factores ya citados sobre los ciclos hidrológicos (1, 14, 16, 27, 28, 40, 42).

Jaramillo y Chaves (24), en ensayos efectuados sobre un bosque, un cafetal bajo sombrío de guamo y uno a libre exposición, encontraron que el comportamiento de las tres coberturas es similar hasta un límite próximo a los 50mm de lluvia externa y que a partir de este valor se visualiza la influencia de la cobertura sobre la lluvia efectiva.

De Las Salas y García (8), observaron valores de lluvia efectiva entre el 72 y el 80% de la lluvia externa cuando hicieron evaluaciones en un bosque nativo y en una plantación de eucalipto. Igualmente Huber y Trecaman (18), para una comunidad de *Eucalyptus nitens* registraron valores de lluvia efectiva del 70% de la lluvia externa. Imbach *et al.* (19), determinaron que existen diferencias significativas entre los valores de intercepción de lluvia para sistemas de *Coffea arabica* con *Erythrina poeppigiana* en comparación con un sistema de *Coffea arabica* con *Cordia alliodora*.

Jaramillo y Chaves (23), al analizar las frecuencias del agua interceptada con relación al agua lluvia registrada en la parte externa, determinaron que un 17% de las medidas en el bosque y en el cafetal bajo sombrío presentan valores superiores a los observados en la parte externa; para las condiciones de cafetal a libre exposición solar un 26% de los datos son superiores.

Silva (35), obtuvo mayores valores de escorrentía directa en un bosque ralo que en una sabana. De acuerdo con estudios hechos por Suárez de Castro y Rodríguez (37), las pérdidas de agua por percolación en un tratamiento de suelo desnudo fueron mayores que las pérdidas obtenidas en el tratamiento de cobertura muerta, y éstas a su vez, resultaron mayores que en un suelo con cobertura viva.

Aunque no se encuentren diferencias apreciables en los valores máximos de escorrentía cuando se evalúan diferentes cubiertas vegetales, para las mismas condiciones los valores máximos de percolación pueden diferir, y el comportamiento de la humedad volumétrica del suelo se comporta también de manera diferente, según los regímenes de sombra (24).

En general, para cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes tipos de sombrero la mayor proporción de la lluvia externa 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 de la cual un 38% se infiltra en el perfil del suelo y un 6% es agua de escorrentía. La máxima interceptación de la lluvia, de 61%, se observó en los cafetales con sombrero de nogal y la mínima en cafetales a libre exposición solar (20).

**Ciclo de nutrimentos.** El movimiento de nutrimentos es uno de los aspectos claves en la dinámica de los ecosistemas terrestres y forma parte integrante en la evolución de los sistemas ecológicos, ya sea en condiciones naturales, o bien, sometidos a perturbaciones artificiales (34).

Los ciclos 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 los organismos individuales (22).

Muchos aspectos del ciclo de nutrimentos pueden verse afectados directamente por la selección de la especie de sombrero, teniendo en cuenta que esas especies difieren significativamente en la producción y la tasa de descomposición de biomasa con respecto a la especie subyacente (2).

Durante ensayos realizados por Veneklaas (40), el flujo neto de la mayoría de nutrimentos en el agua de lavado fue proporcional a los volúmenes de lluvia, lo que significa una mayor lixiviación en períodos con abundante precipitación. Jaramillo (21), registró concentraciones de potasio en el agua escurrida desde la vegetación, 30 veces superiores a las medidas

en la lluvia incidente mientras que para el calcio y el magnesio los factores de relación fueron 2,1 y 2,9, respectivamente.

Cavelier *et al.* (6), registran altas concentraciones de potasio en la lluvia efectiva en relación con los datos obtenidos para otros elementos (155kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de potasio por 34,8kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de Ca y 9,2kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de Mg), lo que hace suponer una mayor dinámica del potasio dentro del sistema.

Jaramillo (22), observó gran variabilidad en las cantidades de los elementos químicos en los diferentes componentes del ciclo hidrológico, cuando evaluó diferentes especies de sombrero para café comparando entre estos sistemas y tomando como referencia un cafetal a libre exposición y un bosque.

Esta investigación tuvo como propósito describir los fenómenos de redistribución de la lluvia y transporte de nutrimentos en los componentes del ciclo hidrológico, en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** El experimento se realizó durante del período comprendido entre Octubre de 2002 y Julio de 2003, en la Estación Central Naranjal – Chinchiná – Caldas, localizada a 04°58' de latitud Norte, 75°39' de longitud Oeste y a una altitud de 1.381m. Las condiciones climáticas anuales son las siguientes: Lluvia de 2.556mm, brillo solar de 1.817 horas, humedad relativa del 78%, temperatura media de 20,8°C, temperatura mínima 16,4°C y temperatura máxima 26,8°C (10).

El experimento se llevó a cabo sobre parcelas pertenecientes al experimento FIT 1013 “Efecto de la intensidad del sombrero sobre la respuesta del café a la fertilización”. Las especies que se encontraban establecidas en

dichas parcelas eran: café (*Coffea arabica* L. var. Colombia) sembrado de 1995 y guamo (*Inga edulis* Mart), sembrado en 1993. Las características de las parcelas experimentales se presentan en la Tabla 1.

**Metodología.** La cantidad de lluvia externa que ingresó al ecosistema se midió con 4 pluviómetros con un área de captación de 24cm<sup>2</sup>, instalados fuera de las parcelas. Con estos datos se calculó el acumulado de lluvia durante el tiempo transcurrido entre las lecturas. La lluvia efectiva (L) se midió para cada parcela experimental en 20 pluviómetros semejantes a los externos, en un arreglo en 2 filas y 10 pluviómetros/fila.

Según lo propuesto por Rutter *et al.* (33), la porción de lluvia interceptada (I, mm), se calculó como la diferencia entre los acumulados de lluvia externa (P, mm) y los de lluvia efectiva (L, mm).

$$I = P - L$$

La capacidad de almacenamiento del dosel (S, mm), se estimó haciendo uso del modelo de Rutter (32), como el valor del intercepto en el modelo de regresión lineal simple:

$$I = bP + S$$

Donde:

*I* = la interceptación,

*P* = la lluvia externa y

*S* = la capacidad de almacenamiento.

La evapotranspiración potencial (ETP) se estimó mediante la ecuación de Penman-Monteith:

$$E_{tp} = \frac{\Delta Rn + pc\delta e / ra}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

Donde *E<sub>tp</sub>* (mm) es la evapotranspiración potencial, *D*(Pa°C<sup>-1</sup>), es el incremento de presión de saturación de vapor de agua a la temperatura del aire obtenido con las lecturas del psicrómetro; *Rn* (J m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) es la radiación neta estimada a partir del brillo solar diario; *p* (kg m<sup>-3</sup>) y *c* (J kg<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>) son respectivamente las constantes físicas para la densidad y el calor específico del aire; *de* (Pa) es el déficit de presión de vapor, calculado con las lecturas diarias del psicrómetro; *ra* (s m<sup>-1</sup>) es la resistencia aerodinámica del cultivo, calculada a partir de la velocidad del viento medida con el anemómetro de la estación climática; *l* (MJ kg<sup>-1</sup>) es el calor latente de vaporización de agua, el cual es una constante física (2,54 a 20°C); y *g* (Pa °C<sup>-1</sup>) es la constante psicrométrica (41).

**Tabla 1.** Características de las parcelas experimentales

Parcela	Área	Distancia de siembra (m)		Fertilización*
		Café	Guamo	
6F0	182,3	1,5 x 1,5	6 x 6	No
6F1	182,3	1,5 x 1,5	6 x 6	Si
9F0	380,5	1,5 x 1,5	9 x 9	No
9F1	380,5	1,5 x 1,5	9 x 9	Si
12F0	650,3	1,5 x 1,5	12 x 12	No
12F1	650,3	1,5 x 1,5	12 x 12	Si

\* Fertilizante 25-4-24 162g/árbol de café/año

La escorrentía (E), se midió en predios con un área de captación de 12m<sup>2</sup> delimitados lateralmente por láminas de geomembrana y frontalmente por placas metálicas. El agua captada se recolectó en recipientes plásticos debidamente calibrados de acuerdo al área de captación.

La percolación (D), se calculó haciendo uso del método indirecto (7, 21), calculando la percolación (D) como la diferencia entre la lluvia efectiva (L) y la escorrentía (E):

$$D = L - E$$

También se utilizó un método directo por medio de lisímetros (3, 4, 15, 30) haciendo uso de un sistema diseñado para la presente investigación en donde se requería medir volumen de agua percolada y realizar el análisis químico. El lisímetro del presente estudio se construyó con un tubo de PVC de 10,16cm de diámetro y 40cm de longitud, biselado en uno de sus extremos para facilitar su penetración en el suelo. Dicho tubo se introdujo en el perfil del suelo haciendo que su borde superior coincidiera con el nivel de la superficie. Una vez incrustado el tubo se cavó una calicata adyacente a la posición del tubo, y se estableció comunicación con éste a través de un pequeño túnel paralelo a la pendiente del terreno. A continuación el tubo fue taponado en su parte inferior y se conectó mediante una manguera de 1,27 cm de diámetro, a un recipiente plástico con una capacidad de 5 litros ubicado en el fondo de la calicata, para recolectar el agua percolada. Se instalaron 2 lisímetros por parcela.

La tensión de la humedad del suelo (H), se determinó por medio de tensiómetros de mercurio, instalados a profundidades de 20 y 40 cm (21).

Los componentes del ciclo hidrológico evaluados químicamente fueron: Lluvia externa, lluvia efectiva, agua de escorrentía y agua

de percolación. Las muestras de agua se tomaron de los colectores usados para las medidas del ciclo hidrológico, y su análisis se realizó en los laboratorios de Multilab ubicados en Cenicafé. Para cada muestra se determinó: pH (método potenciométrico) y contenido de K, Ca y Mg (mediante espectrofotometría de absorción atómica). Con los datos obtenidos se estimó el pH y las cantidades de nutrientes en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para cada uno de los componentes evaluados; se efectuaron comparaciones teniendo en cuenta el componente del ciclo hidrológico y las características de la cobertura (densidad de siembra y porcentaje de cobertura vegetal).

El porcentaje de cobertura vegetal se calculó para cada parcela mediante un Canopy Analyzer Li-COR 2000®.

**Análisis Estadístico.** Para cada distancia de siembra y porcentaje de cobertura vegetal se aplicó la estadística descriptiva, para cada una de los componentes del ciclo hidrológico y las cantidades de los elementos químicos a analizar, a través del tiempo. Se establecieron los modelos estadísticos que describían el comportamiento de la lluvia efectiva, interceptación, escorrentía, y percolación con la lluvia externa que ingresó al sistema. Teniendo en cuenta si los modelos para las diferentes distancias de siembra del sombrero y porcentajes de cobertura vegetal, en cada relación a evaluar mostraban la misma estructura, se procedió a compararlos con el estadístico de prueba f, al 5%. En caso contrario se declaró diferencia por defecto.

Se hizo el análisis de varianza de una vía para evaluar el efecto de las distancias de siembra el y porcentaje de cobertura en las cantidades de los nutrientes y en el caso que el análisis mostrase efecto de las distancias y de la cobertura, se procedió a evaluar la tendencia lineal o cuadrática, con el estadístico de prueba f, al 5%.

Se estimó la humedad del suelo para cada distancia con el modelo de balance hídrico desarrollado en Cenicafe (humedad del suelo calculada) (25), para el período de estudio y se comparó con la humedad del suelo medida en el campo mediante la tensiometría.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Lluvia efectiva, interceptación por la vegetación y capacidad de almacenamiento del dosel.

Se observó una gran variabilidad en los resultados obtenidos cuando se evaluaron los acumulados de lluvia individuales para cada uno de los pluviómetros ubicados bajo la influencia de la cobertura vegetal (Figura 1). Estos mismos resultados muestran que un 56,5% de las 8.424 lecturas realizadas bajo la cobertura tienen valores superiores en comparación con los obtenidos en la parte externa del sistema (Tabla 2).

Esta gran variabilidad se atribuye al efecto ejercido por la cobertura vegetal cuando retiene y concentra agua en puntos específicos redistribuyéndola de manera no uniforme, así como al efecto de la velocidad y dirección del viento durante la lluvia y a la duración de la misma (26). De esta manera no es posible establecer ninguna relación entre las lecturas

de pluviómetros correspondientes a la misma parcela, ni siquiera cuando se comparan puntos adyacentes, como tampoco considerar la lluvia efectiva en puntos particulares de medición como una fracción constante de la lluvia externa. Resultados similares fueron encontrados en otros estudios (5, 22, 23, 38).

Se halló una relación directa entre los volúmenes de lluvia efectiva y lluvia externa (Tabla 3, Figura 2), sin que los porcentajes de lluvia efectiva variaran de manera significativa, de acuerdo con el porcentaje de cobertura vegetal o la distancia de siembra del sombrío (Tabla 4). La relación lineal entre lluvia externa y lluvia efectiva se debe sin duda al hecho de que cuando el dosel se satura la fracción de lluvia interceptada disminuye y tiende a estabilizarse en su valor máximo. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por otros autores (17, 31), quienes encontraron en sus estudios que las lluvias débiles tienden a ser las más interceptadas.

Según Rutter (32) y Rutter *et al.* (33), en los modelos de regresión lineal de lluvia efectiva vs lluvia externa, la pendiente e intercepto pueden interpretarse como el porcentaje de lluvia efectiva y la capacidad de almacenamiento del dosel, respectivamente, calculándose la interceptación como el complemento de la llu-

**Tabla 2.** Porcentaje de las lecturas de agua de lavado foliar interceptada en la superficie de suelo, bajo diferentes densidades de siembra de guamo.

Parcela	Mayor que 100 %	CV (%)	n
6F0	60	26,1	1.411
6F1	58	21	1.397
9F0	56	24,7	1.399
9F1	51	30,3	1.411
12F0	56	21,5	1.412
12F1	58	19	1.394

CV: Coeficiente de variación.

n : número de observaciones.

100% representa el agua captada en la parte externa de las parcelas.

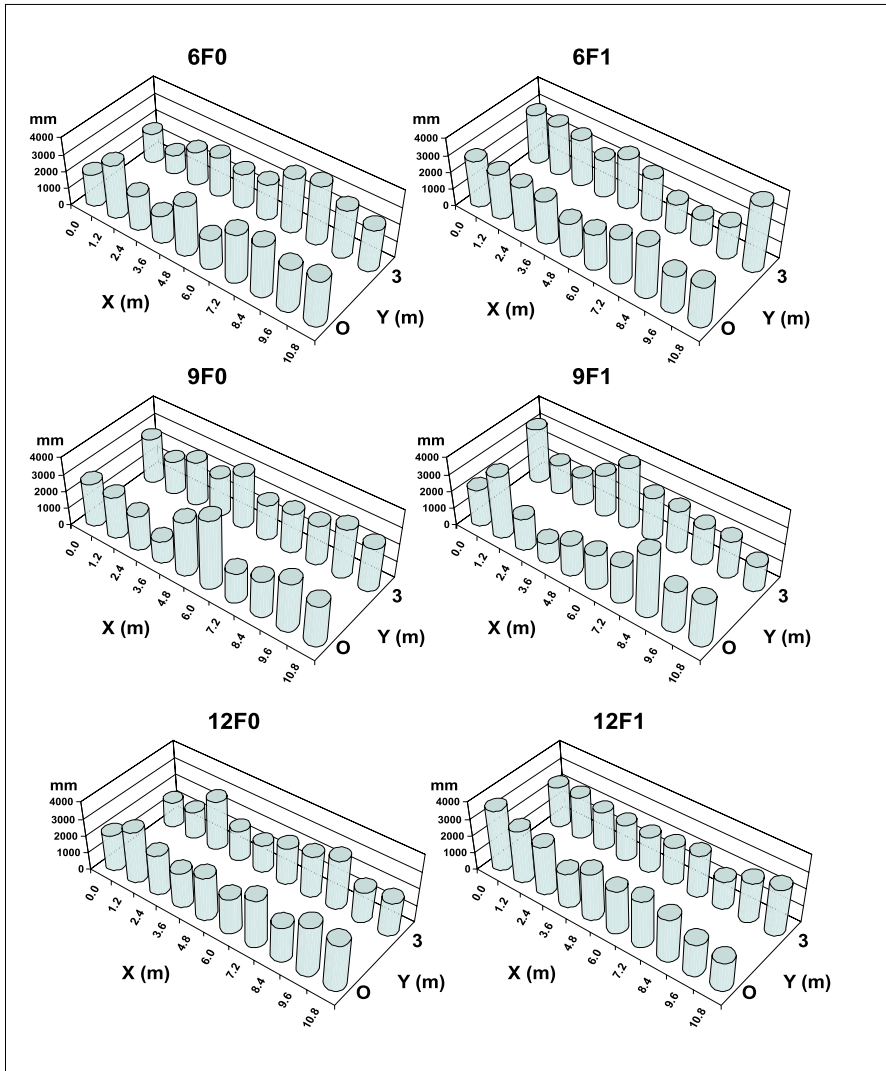


Figura 1. Acumulados de lluvia efectiva en cada parcela.

Tabla 3. Coeficientes de regresión según modelo de Rutter *et al.* (33).

Parcela	Cobertura (%)	Pendiente	Intercepto	R <sup>2</sup>	n
6F0	76,4	0,782	0,92	0,97	1.411
6F1	76,9	0,846	-0,46	0,99	1.397
9F0	87,5	0,779	0,19	0,97	1.399
9F1	91,4	0,705	1,77	0,96	1.411
12F0	67,3	0,786	0,79	0,97	1.412
12F1	65,04	0,828	-0,07	0,98	1.394

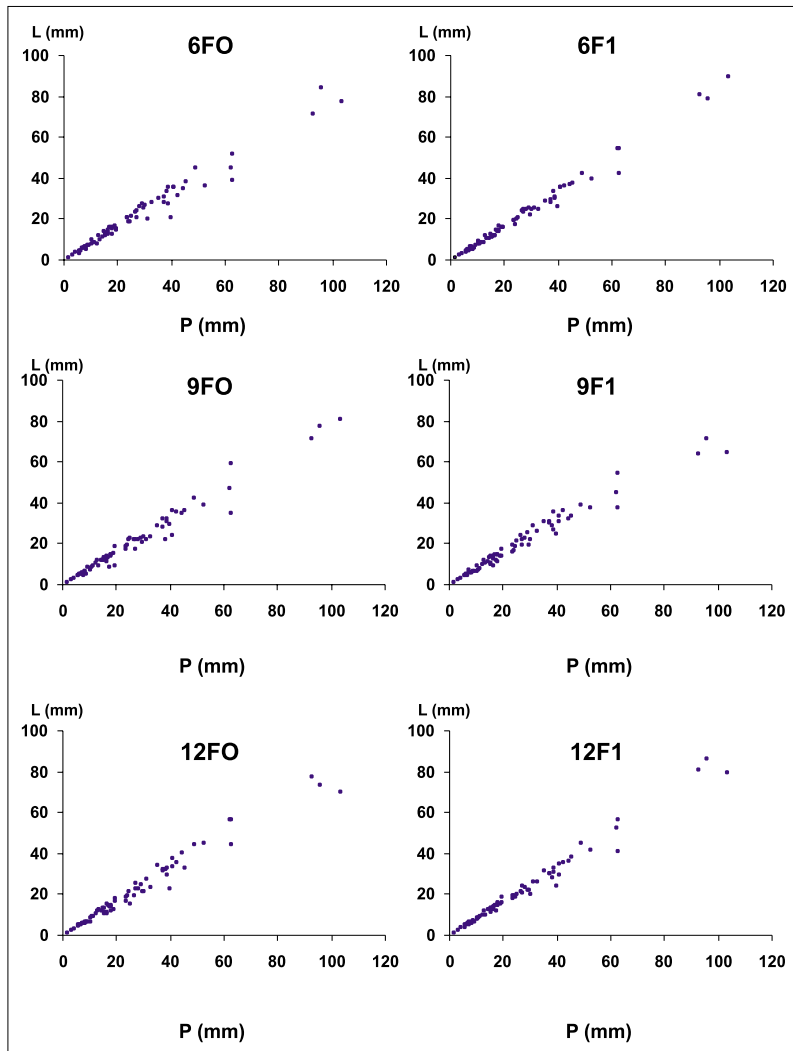
*n* = Número de observaciones

**Tabla 4.** Lluvia efectiva e interceptación en mm, acumuladas por la vegetación

Parcela	Cobertura (%)	Lluvia Efectiva (mm)	Interceptación (mm)	n*
6F0	76,4	1531	343	1.411
6F1	76,9	1553	322	1.397
9F0	87,5	1474	400	1.399
9F1	91,4	1446	429	1.411
12F0	67,3	1530	345	1.412
12F1	65,04	1548	327	1.394

\* n = Número de observaciones

Lluvia externa durante el período de estudio = 1.876 mm



**Figura 2.** Relación entre lluvia efectiva (L) y lluvia externa (P) en cada parcela.



via efectiva con respecto a la lluvia externa. Pero no necesariamente la interceptación obedece a un comportamiento lineal, cuando se hace la evaluación de cada evento por separado (Figura 3). En estos términos, es posible afirmar que entre un 70 y un 85% de la lluvia externa es lluvia efectiva, mientras que la interceptación varió entre el 15 y el 30% es decir, que en promedio de los 1.876mm acumulados durante el periodo de estudio, 1.477mm corres-

ponde a la lluvia efectiva y los 399mm restantes fueron retenidos por la vegetación en forma de agua interceptada (Tabla 4).

Estos resultados difieren de los encontrados por Jaramillo (21), quien halló valores del 58 y 49% de lluvia efectiva en sistemas agroforestales con características muy similares a las de este estudio. Esta diferencia se debe principalmente a la disposición de la red

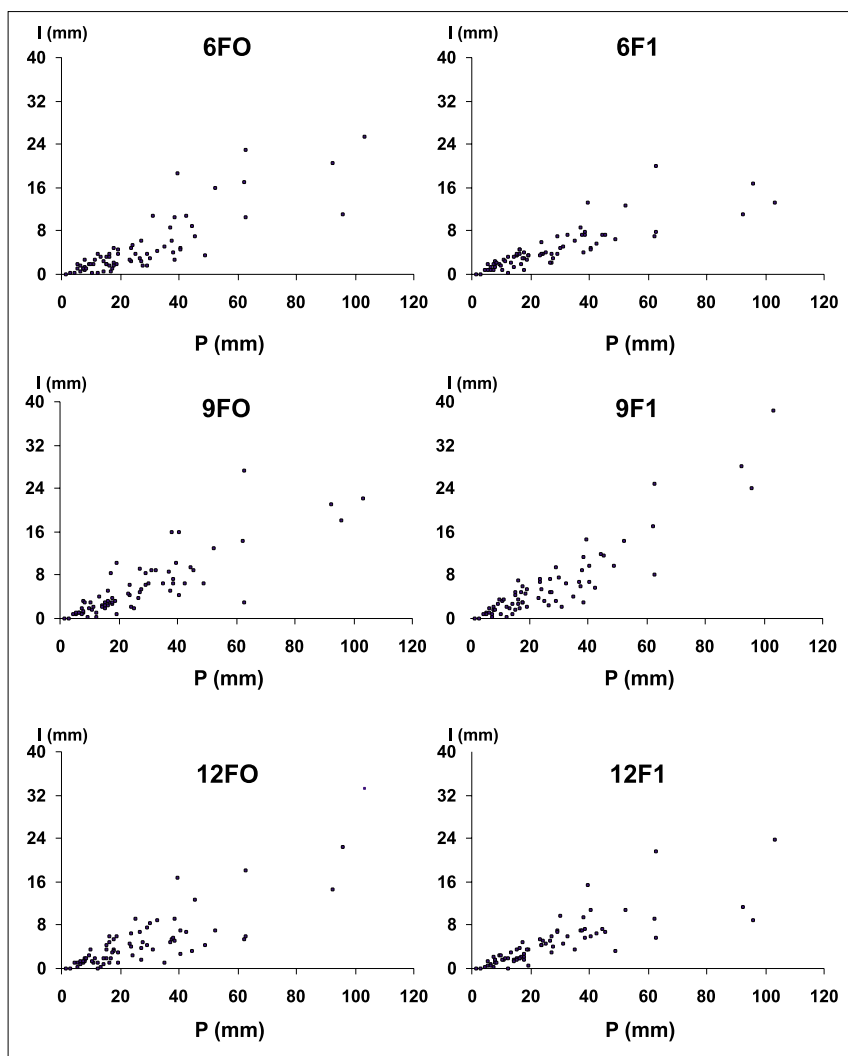


Figura 3. Relación entre interceptación (I) y lluvia externa (P) en cada parcela.

de pluviómetros, la cual, para el caso de los experimentos realizados por el citado autor fue ubicada debajo de los cafetos, mientras que en el presente experimento se situó en el centro de las calles, bajo la única interferencia de la especie utilizada como sombrío. Esta situación demuestra la gran influencia de la distancia de siembra del café sobre el ciclo hidrológico, cuando se utilizan altas densidades.

Los valores de lluvia efectiva e intercepción aquí presentados son semejantes a los registrados en otros estudios (5, 8, 18, 39).

**Escorrentía y Percolación.** Del total de 1.876mm de lluvia externa acumulada durante el período de estudio, en promedio el 4,6% corresponde a la escorrentía y 63,6% a la percolación, con valores extremos de 49,9mm y 132,8mm para la escorrentía y 938,4mm y 1.403,5mm para la percolación medida, tomada como valor real de percolación para este estudio por razones más adelante expuestas (Tabla 5).

Los valores de escorrentía hallados muestran que no existe una relación directa entre la cantidad de agua que escurre con la que entra al sistema (Figura 4). Al hacer el análisis estadístico de los datos tampoco se hallaron diferencias entre los valores de escorrentía para cada una de las distancias de siembra o porcentajes de cobertura evaluados. Valores de escorrentía semejantes fueron hallados por otros

autores en sistemas agroforestales de características muy similares a las de este estudio, por ejemplo Jaramillo (21), encontró pérdidas por escorrentía de 5% de la lluvia externa en cafetales bajo sombrío de guamo.

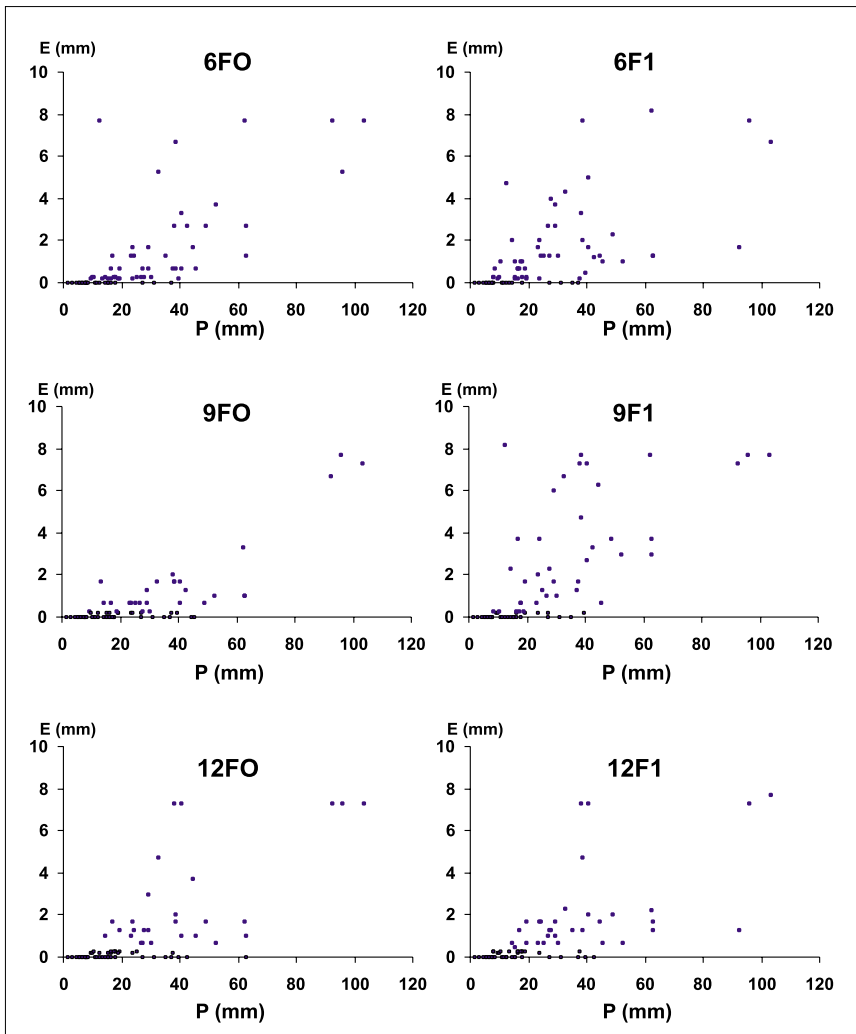
En contraste con los bajos valores de escorrentía, los valores de percolación (tanto calculada como medida), estuvieron muy por encima del 50% de la lluvia externa acumulada durante el período de estudio (Tabla 5). La gran diferencia entre estos valores puede deberse a la baja pendiente del terreno en donde se llevó a cabo el experimento (<30%), lo cual desfavorece la escorrentía; igualmente, la cobertura vegetal actúa como una barrera que demora el proceso de entrada de la lluvia al sistema y además, reduce la velocidad de caída de las gotas lo que representa un drenaje lento desde el follaje, factor que favorece la percolación y reduce la escorrentía, y concuerda con lo expuesto por Jaramillo y Chaves (23).

Otro factor que influye en los altos valores de percolación es la textura franco arenosa del suelo donde se hizo el ensayo, la cual puede asociarse con altas tasas de infiltración. Cuando se compararon los valores de percolación calculada con los de percolación medida se halló una relación lineal entre ambas, con una tendencia creciente de los dos valores con respecto a la lluvia externa (Figura 5).

**Tabla 5.** Valores de escorrentía y percolación acumuladas durante el periodo de estudio

Parcela	Cobertura (%)	Escorrentía (mm)	Precipitación (mm)	Percolación (mm)	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>
6F0	76,4	87,1	1444,2	938,4	71	142
6F1	76,9	96,9	1456,1	1201,5	71	142
9F0	87,5	49,9	1424,5	1324,5	71	142
9F1	91,4	132,8	1313,6	977,1	71	142
12F0	67,3	74,8	1455,5	1310,9	71	142
12F1	65,04	73,4	1474,6	1403,5	71	142

Esc: Escorrentía Prm: Percolación medida Prc: Percolación calculada  
n<sub>1</sub>: Observaciones Esc n<sub>2</sub>: Observaciones Prc y Prm



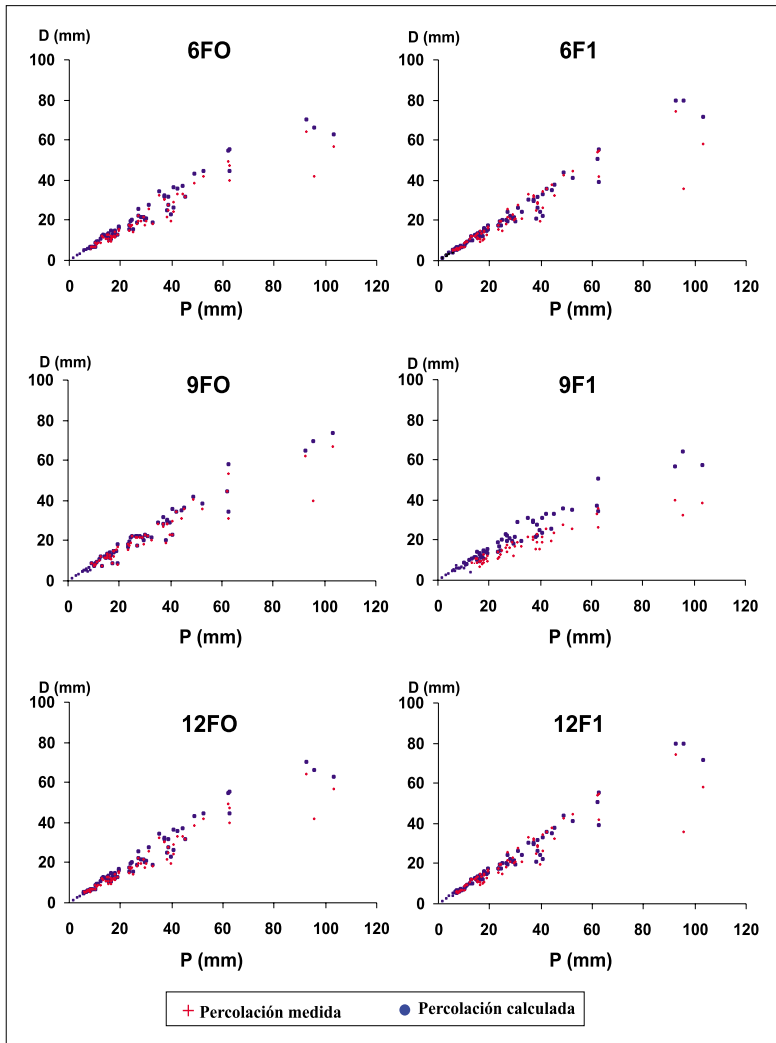
**Figura 4.** Relación entre la escorrentía (E) y lluvia externa (P) en cada parcela.

Los resultados muestran que la percolación calculada sobrestima la percolación medida, debido sin duda a que la primera ignora factores como la interceptación y almacenamiento de humedad por la hojarasca y por las arvenses. En promedio, la percolación calculada sobrestimó en un 16,6% a la percolación medida.

El análisis estadístico mostró que si bien existen diferencias entre los valores de percolación medida hallados para las diferen-

tes parcelas, estas diferencias no obedecen ni a la distancia de siembra ni al porcentaje de cobertura del sombrío, lo que hace pensar en la intervención local de otros elementos no tenidos en cuenta en este análisis, como la pendiente del terreno, la acumulación de hojarasca, el cubrimiento por arvenses y las condiciones iniciales de humedad del suelo.

Estos resultados permiten concluir que para unas condiciones específicas, aunque no ha-



**Figura 5.** Relación entre la percolación (D) y lluvia externa (P) en cada parcela

yan diferencias en los niveles de escorrentía si pueden ocurrir variaciones en los niveles de percolación, y que dos fenómenos aparentemente dependientes entre sí posiblemente muestren comportamientos muy diferentes influenciados por otros factores, como la topografía, las características físicas del suelo, la intensidad y la duración de la lluvia, y muy probablemente los puntos donde se hagan las mediciones.

**Humedad del suelo.** Debido a que el comportamiento de los valores de humedad fue igual para las dos profundidades evaluadas (20 y 40cm), se tomó el promedio de ambas lecturas como la humedad almacenada entre 0 y 40cm. Cuando se evaluaron estos valores para acumulados de 10 días se encontraron diferencias significativas (según prueba de Duncan) para las diferentes distancias de siembra (Tabla 6).

**Tabla 6.** Valores medios de humedad medida en el suelo por distancia de siembra

Distancia de siembra ( m )	Humedad (mm)	Grupo	n
6 x 6	173,87	a*	29
9 x 9	139,55	c	29
12 x 12	165,93	b	29

Humedad: Humedad media almacenada en mm.

\* Grupo: Categoría según prueba de Duncan, medias con la misma letra no son diferentes  
n: Décadas evaluadas

Estos resultados muestran también que aún cuando la humedad del suelo calculada a través del modelo de balance hídrico muestre variaciones a lo largo del tiempo, la humedad medida en el campo mediante tensiómetros presenta un valor constante (por lo cual se tomó un valor medio para el período de estudio) y superior al calculado.

De esta manera es posible que se generen errores al momento de definir los puntos críticos de almacenamiento de agua (74,3mm como capacidad de campo y 44,5mm como punto de marchitez permanente para el presente estudio), como lo encontró Gómez (12), quien con valores de humedad del suelo cercanos a 10%, obtuvo valores positivos de fotosíntesis en café, lo cual indicó que no se había llegado al punto de marchitez.

La baja variabilidad de la humedad almacenada en el suelo demuestra la importancia del sombrero como un regulador de las pérdidas hídricas, y como un amortiguador del efecto de los períodos prolongados sin lluvia y de los fenómenos de evaporación, no sólo como una consecuencia del efecto de la parte aérea de la vegetación, sino también de la hojarasca, que retiene una parte del agua que de otra manera se perdería como escorrentía o como percolación.

Atendiendo al hecho de que para las distancias de siembra evaluadas los valores de los diferentes componentes del ciclo hidrológico no hayan variado significativamente, las dife-

rencias en los valores de humedad no pueden explicarse como debidas a la densidad de siembra y debe suponerse la interferencia de factores no evaluados.

**Ciclo de nutrimentos.** Al evaluar las cantidades de nutrimentos en  $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$  contenidos en la lluvia externa, la lluvia efectiva, la escorrentía y la percolación (Tabla 7), se encontraron diferencias entre los valores observados para cada nivel de fertilización. Los contenidos de potasio en el agua de lavado foliar, escorrentía y percolación fueron más altos en las parcelas sometidas al nivel máximo de fertilización que en aquellas no fertilizadas y en ambos casos, los contenidos de potasio en el agua de lavado foliar fueron significativamente más altos que los encontrados en la lluvia externa, lo revela la gran movilidad de este elemento desde el follaje. Estos resultados concuerdan con los hallados por otros autores (6, 21).

Los datos muestran que las cantidades de potasio aumentan en el agua de lavado foliar en todos los sistemas estudiados cuando se comparan con las cantidades aportadas inicialmente por el agua lluvia, lo cual concuerda con lo expresado por Golley (11), 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. Cabe destacar los altos contenidos de calcio en el agua de percolación, mayores que los encontrados en la lluvia externa y en la lluvia efectiva, lo que indica que si bien hay movimiento de este elemento desde

**Tabla 7** . pH y cantidades de nutrimentos en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> contenidos en la lluvia externa (P), la lluvia efectiva (L), la escorrentía (E) y la percolación (D)

Nivel	P	Distancia de siembra de guamo									Media			
		6m x 6m			9 mx 9m			12m x 12m						
		L	E	D	L	E	D	L	E	D	L	E	D	
Sin Fertilización	pH	6,9	6,2	6,3	6,0	6,3	6,2	5,5	6,1	6,0	5,3	6,2	6,2	5,6
	K	82,2	59,1	8,4	16,1	87,9	4,9	52,6	114,6	9,5	107,8	87,2	7,6	58,8
	Ca	14,5	12,3	5,6	142,8	13,6	5,5	247,2	35,0	5,9	207,4	20,3	5,7	199,1
	Mg	29,2	5,9	0,5	9,5	4,1	0,6	54,2	14,8	1,8	36,0	8,3	1,0	33,2
Con Fertilización	pH	6,9	6,4	6,2	5,9	6,2	6,1	5,4	6,4	6,3	5,5	6,3	6,2	5,6
	K	82,2	217,9	13,5	145,9	59,2	13,1	22,1	269,1	7,4	88,5	182,1	11,3	85,5
	Ca	14,5	14,9	10,7	150,1	6,7	9,3	126,1	36,6	4,4	195,0	19,4	8,1	157,1
	Mg	29,2	10,2	1,5	23,8	6,2	2,0	23,0	22,4	1,0	38,4	12,9	1,5	28,4

el follaje hacia el suelo los mayores aportes pueden estar asociados a la descomposición de la hojarasca y a la lixiviación del elemento desde el perfil del suelo.

Los contenidos de magnesio en la lluvia efectiva fueron más bajos que aquellos encontrados en la lluvia externa; no obstante, el contenido de magnesio en el agua de percolación es equiparable al encontrado en la lluvia externa, lo que hace pensar que este elemento está siendo removido de los perfiles superiores del suelo hacia zonas más profundas. Las diferencias entre las cantidades de nutrimentos en los diferentes componentes del ciclo hidrológico están relacionadas directamente con los volúmenes de agua que se mueven a través del sistema, como lo sugiere Veneklaas (40).

Las cantidades de nutrimentos en el agua de lavado foliar calculadas para este estudio son comparables con las citadas por Veneklaas (40) en bosques tropicales de Puerto Rico, Jamaica, Nueva Guinea, Venezuela y dos localidades de Colombia con los siguientes va-

lores en promedio: Potasio 79,0kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, calcio 20,6 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y magnesio 9,0 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Los valores obtenidos durante las observaciones del estudio también son comparables con los hallados en estudios realizados en Costa Rica, Nueva Guinea y Venezuela (9, 13, 19, 36). En los resultados obtenidos se observan variaciones en las cantidades de los elementos químicos, confirmando lo expresado por Beer *et al.* (2), quienes manifiestan que muchos de los aspectos en el ciclo de los nutrimentos son directamente afectados al escoger las especies de sombrero debido a que éstas difieren significativamente en la composición de biomasa.

En todos los casos, el pH del agua redistribuida dentro del sistema fue menor al encontrado en la lluvia externa siendo notable la disminución de su valor en el agua de percolación. Bajo condiciones muy similares a las de este estudio, Jaramillo (22), encontró valores de pH de 6,6 y 6,7 para el agua de lavado foliar y de escorrentía, respectivamente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Celso Arboleda V. de la Estación Central Naranjal, por su valiosa colaboración a lo largo de este estudio. A la Dra. Esther Cecilia Montoya R, de la Disciplina de Biometría por su asesoría en la interpretación de datos y análisis estadístico. A Alexander Arias, por su apoyo en la fase de campo de este trabajo y al personal de la Disciplina de Agroclimatología.

## LITERATURA CITADA

1. ASDAK, C.; JARVIS, P. G.; GARDINGEN, P. VAN; OFRASER, A. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology* 206(3-4): 237-244. 1998.
2. BEER, J.; MUSCHLER, D. K.; SOMARRIBA, E. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38: 139-164. 1998.
3. BJERRE, H. J.; ENGELUND, H. P.; AAGÅRD, H. E.; HJELMAR, O. Use of lysimeters for characterization of leaching from soil and mainly inorganic waste materials. Nordtest Technical Report: Nordtest project 1494-00. Final Report, 2000. Online Internet. Disponible en: <http://www.nordtest.org/register/techn/tlibrary/tec473.pdf>. (Consultado en 09/04/02).
4. BRYE, K. R.; NORMANJ, J. M.; BUNDY, L. G.; GOWER, S. T. An equilibrium tension lysimeter for measuring drainage through soil. *Soil Science Society of American Journal* 63: 536-543. 1999.
5. CANTÚ S., I.; GONZÁLEZ R., H. Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pino - encino en el noreste de México. *Ciencia UANL* 5(1): 72-77. 2002.
6. CAVELIER, J.; JARAMILLO, M.; SOLIS, D. ; LEON, D. DE Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology* 193(1-4): 83-96. 1997.
7. DASTANE, N. G. Precipitación efectiva en la agricultura de regadío. Roma, FAO, 1974. 68 p. (Estudio sobre Riego y Avenamiento No 25).
8. DE LAS SALAS, G.; GARCIA O., C. 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* 24(91): 205-218. 2000.
9. EDWARDS, P. J. 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. 1982.
10. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FEDERACAFE. BOGOTÁ. COLOMBIA. Condiciones climáticas de la Subestación Experimental Naranjal. Archivos climáticos 1956-1998. Chinchiná, Cenicafe. Disciplina de Agroclimatología, 1956-1998.
11. GOLLEY, F.B. Nutrient cycling and nutrient conservation. In: Golley, F.B. Ed. *Tropical rain forest ecosystems; structure and function*. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1991. p. 137-156. (Ecosystems of the World Vol. 14A).
12. GÓMEZ M., O. F. Efecto del estrés hídrico sobre la actividad fotosintética en la planta de café (*Coffea arabica* L. cv. Colombia). Manizales, Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2000. 69 p. (Tesis: Ingeniero Agrónomo)
13. GRIMM, U.; FASSBENDER, H. W. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes occidentales de Venezuela. III. Ciclos hidrológicos y translocación de elementos químicos en el agua. *Turrialba* 31: 89-99. 1981.
14. HANCHI, A., RAPP, M. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management* 97: 231-235. 1997.
15. HONGVE, D. Production of dissolved organic carbon in forested catchments. *Journal of Hydrology* 224: 91-99. 1999.
16. HUBER, A.W.; OYARZUN, C.E. Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Turrialba* 40(4): 503-508. 1990.

17. HUBER, A. W.; OYARZUN, C. E. Redistribución de las precipitaciones en un bosque siempreverde del sur de Chile. *Turrialba* 42(2): 192-199. 1992.
18. HUBER, A. W.; TRECAMAN, R. Consecuencia de las plantaciones forestales sobre la disponibilidad del recurso hídrico en suelos rojos arcillosos de la zona de Colpulli, IX región, Chile. Facultad de Ciencia. Universidad Austral de Chile. VI Jornadas del CONAPHI, Chile. Tema B. Agua y medio ambiente 1999. Online Internet. Disponible en <http://unesco.org.uy/phi/libros/VIJornadas/B18.pdf> (Consultado en 19/09/02).
19. IMBACH, A. C.; FASSBENDER, H. W.; BEER, J.; BOREL, R.; BONNEMANN, A. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*). Balances hídricos e ingreso con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. *Turrialba* 39(3): 400-414. 1989.
20. JARAMILLO R., A. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé* N° 262: 1-4. 1999.
21. JARAMILLO R., A. Redistribución de la lluvia y transporte de nutrimentos en cafetales. *In: Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en los Andes*, 4. Noviembre 25 – Diciembre 1, 2001. Mérida (Venezuela), Asociación de Montañas Andinas, 2001. 15 p.
22. JARAMILLO R., A. Contenido de nutrimentos en la lluvia, agua de lavado foliar y escorrentía en cafetales con diferentes sombríos. *In: Congreso Colombiano de Meteorología*, 6. Bogotá, Marzo 20 – 22, 2002. Bogotá, IDEAM-SOCOLMET, 2002. 10 p.
23. JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 49(2): 129-135. 1998.
24. JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* 50(2):97-105. 1999.
25. JARAMILLO R., A.; GOMEZ M., O.F. Desarrollo de una aplicación de cómputo para el cálculo del balance hídrico en cafetales. Chinchiná, *Cenicafé*, 2002. 35 p.
26. KLAASSEN, W.; LANKREIJER, H. J. M.; VEEN, W. L. A. Rainfall interception near a forest edge. *Journal of Hydrology* 185: 350-361.1996.
27. LIU, S. Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida. *Journal of Hydrology* 207: 32-41. 1998.
28. LLOYD, C. R.; MARQUES FILHO, A. DE O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 63-73.1988.
29. MATEOS, A. B.; SCHNABEL, S. Medición de la interceptación de las precipitaciones por la encina (*Quercus rotundifolia* lam.): Metodología e instrumentación. *In: Hidrología y erosión de suelos*. p. 195-112. Norba Geografía, 1998. Online Internet. Disponible en <http://geot.unex.es/norba/files/10/p7.pdf> (Citado 06/05/03).
30. PERKINS, D. Use and construction of a lysimeter to measure evapotranspiration. [En línea]: Donald P 2001. [Citado 10/04/2003]. Disponible en: <<http://www.llansadwrn-wx.co.uk/evap/lysim.html>>.
31. REBORI, G.; DÍAZ, R. Redistribución de las lluvias y balance de agua de una plantación de *Eucalyptus dunnii* en el sur de Santa Fe. [En línea]: Primera Parte, 2002a. [Citado 27/03/03]. Disponible en <<http://www.sagpya.meccon.gov.ar/0-4/revistas/revista23/dunnii.pdf>>
32. RUTTER, A.J. The hydrological cycle in vegetation. Principles. *In: Monteith, J.L. Ed. Vegetation and the atmosphere*. Vol. 1. London, Academic Press, 1975. p. 111-154.
33. RUTTER, A. J.; KERSHAW, K. A.; ROBINS, P. C. ; MORTON, A. J. A predictive model of rainfall interception in forests. 1. Derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine. *Agricultural and Forest Meteorology* 9(5-6): 367-384. 1971/1972.
34. SANTA REGINA, I.; GALLARDO, J. F. Ciclos biogeoquímicos en bosques de la sierra de Bejar. [En línea]: Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1989. [Citado 14/02/03]. Disponible en <<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a03/CI000523.pdf>>



35. SILVA E., O. Evaluación del escurrimiento y la erosión en condiciones de sabana y bosque claro de altas pendientes. Caso Macapo, Estado Cojedes. Venezuela. (Erosion and runoff evaluation in stepped land under grassland and clear forest conditions. Case under study: Macapo, Cojedes State. Venezuela). *Venesuelos* 2(2): 81-85. 1994.
36. STEINHART, U.; FASSBENDER, H. W. Características y composición química de las lluvias de los Andes occidentales de Venezuela. *Turrialba* 29: 175-182. 1979.
37. SUÁREZ DE C., F.; RODRIGUEZ G., A. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Bogotá, FEDERACAFE, 1962. 473 p.
38. TOBÓN M., C.; BOUTEN, W.; SEVINK, J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology* 237: 40-57. 2000.
39. UBARANA, V. N. Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia. In: Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M.; Victoria, R.L. Eds. Amazonian deforestation and climate. Chichester, John Wiley, 1996. p. 152-161
40. VENEKLAAS, E. Rainfall interception and aboveground nutrients fluxes in Colombian montane tropical rain forest. Utrecht, University of Utrecht, 1990. 105 p.
41. WARD, R. C.; ROBINSON, M. Principles of hydrology. México, McGraw Hill International Editions, 1990. p. 54-78.
42. XIAO, Q.; McPHERSON, E. G.; SIMPSON, J. R. ; USTIN, S. L. Rainfall interception by Sacramento's urban forest. [En línea]: Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS). University of California, Davis, 1998. [Citado 06/02/02]. Disponible:<<http://www.cstars.ucdavis.edu/papers/html/xiaoetal1998a/>>.