

Sistemas Agroforestales de Café (*Coffea arabica*) con Laurel (*Cordia alliodora*) y Café con Poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. VI. Balances Hídricos e Ingreso con Lluvias y Lixiviación de Elementos Nutritivos¹

A. C. Imbach*, H. W. Fassbender**, J. Beer***, R. Borel****, A. Bonnemann○

ABSTRACT

The hydrological balances for the agroforestry systems of *Coffea arabica* with *Cordia alliodora* or *Erythrina poeppigiana* were calculated using measurements taken over four years (1983-1987) of the following climatic (precipitation, evaporation) and edaphological (texture, soil moisture tension, hydraulic conductivity, variation in soil moisture content) parameters. Water fluxes (interception, simulation of transpiration and percolation) were estimated from one year of measurements (1986-1987). Weekly samples of percolated water were taken from March 1986-March 1987 using lysimetric capsules at 100 cm soil depth. N, P, K, Ca and Mg concentrations were determined to calculate the annual lixiviation losses. Nutrient concentration values were extrapolated for the four year observation period, in order to calculate lixiviation losses for the whole study period. With regard to hydric balances, from a total annual precipitation of 1 923 mm, the *C. arabica/E. poeppigiana* coffee system intercepted 68 mm, sweated 811 mm and percolated 1044 mm, while the *C. arabica/C. alliodora* system intercepted 260 mm, sweated only 702 mm and percolated 961 mm. The rates of lixiviation of the nutritional elements reached the following annual levels (kg/ha/a) in the *C. arabica/E. poeppigiana* system: N: 5.79; P: 0.66; K: 1.81; Ca: 27.97; and Mg: 17.81, while in the *C. arabica/C. alliodora* system they were N: 5.61; P: 0.48; K: 2.01; Ca: 7.89; and Mg: 7.17. The obtained values were compared with others from the literature, showing that nutrient leaching in these agroforestry systems is in the range of systems like native or plantation forests from both tropical and temperate areas, and clearly better than annual crop systems.

COMPENDIO

Se presentan balances hídricos de los sistemas agroforestales de *Coffea arabica* con *Cordia alliodora* o *Erythrina poeppigiana* preparados con base en cuatro años (1983-1987) de mediciones de variables climáticas (lluvia, evaporación) y edafológicas (textura, tensión de agua, conductividad hidráulica, contenido de agua del suelo). Las variables hidrológicas (intercepción, simulación de la transpiración y percolación de agua) fueron estimadas a partir de un año de mediciones (1986-1987). Los balances hídricos presentaron como resultado que para un mismo total de precipitaciones de 1 923 mm anuales, el sistema café *C. arabica/E. poeppigiana* interceptó 68 mm, transpiró 811 mm y en él se produjo una percolación de 1044 mm, mientras que en el sistema *C. arabica/C. alliodora* la intercepción alcanzó 260 mm, la transpiración sólo 702 mm y la percolación 961 mm. Se obtuvieron muestras semanales de agua de lixivación durante un año (marzo 1986-marzo 1987) empleando cápsulas lisimétricas a 100 cm de profundidad y se analizaron las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg. Con esta información y la correspondiente a percolación diaria, se calculó luego la lixivación anual total. Se extrapolaron los valores de concentración de nutrientes al período de observación de cuatro años y empleando los valores de percolación anual promedio, se estimaron las pérdidas por lixivación en todo el período. Las tasas de lixivación de los elementos nutritivos alcanzaron los siguientes valores anuales (kg/ha/a) en el sistema *C. arabica/E. poeppigiana*: N: 5.79; P: 0.66; K: 1.81; Ca: 27.97; y Mg: 17.81, mientras que en el sistema *C. arabica/C. alliodora* estos valores fueron N: 5.61; P: 0.48; K: 2.01; Ca: 7.89 y Mg: 7.17. Se discute la importancia de estos valores y se comparan con los de otros ecosistemas forestales y no forestales, naturales e implantados.

¹ Recibido para publicación el 5 de abril 1989

Los autores agradecen al señor Jorge Alvarez su gran dedicación al trabajo de campo, a lo largo del período de estudios; a la señora Lilliam Ugalde de Brenes, su paciente labor de dactilografiado y de correcciones del manuscrito y al señor Emilio Ortiz, la elaboración de los dibujos. Este agradecimiento se hace extensivo al Dr. Gustavo Enriquez, al Dr. Jochen Heuveldop y al Edaf. Roberto Díaz-Romeu, por su valiosa colaboración en diferentes aspectos técnicos. El apoyo técnico y financiero para la realización de este trabajo fue brindado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y por la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)

* Estudiante de Posgrado, CATIE. Actualmente: Proyecto CATIE/UICN, Turrialba, Costa Rica

** Profesor, Facultad Técnica Forestal, Göttingen, República Federal de Alemania

*** Investigador, Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Turrialba, Costa Rica

**** Consultor en agroforestería, San José, Costa Rica

○ Coordinador Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Turrialba, Costa Rica

INTRODUCCION

Los sistemas agroforestales se caracterizan por el establecimiento de varias especies en un mismo sitio y con un arreglo tal, en tiempo y espacio, que origine diversas interacciones entre las especies. De ello resulta una serie de características específicas de sus ciclos hidrológicos, cuya descripción requiere de la consideración de todos los procesos de almacenamiento y transferencia de agua dentro del sistema (Fig 1) (8, 34)

El flujo de agua comienza con el ingreso de la misma al sistema, a través de las lluvias (Pr). Esta puede atravesar directamente el dosel y llegar al suelo (Pd) o bien, puede depositarse en el follaje de las plantas para permanecer en él y luego evaporarse —intercepción (In)— o bien, gotear o deslizarse por las hojas, ramas y/o troncos hasta el suelo (Go). El agua que llega al

suelo se infiltra en el mismo y desde allí puede seguir uno o más de los siguientes caminos: a) permanecer en el suelo, variando su contenido de humedad (HS); b) ser absorbida por las raíces de las plantas (Ab) y luego transpirada (Tr); c) moverse en forma lateral como escorrentía superficial (Es); d) moverse verticalmente en dirección descendente saliendo del sistema como agua de percolación (Pe), al sobrepasar la capacidad de campo del suelo. Con esta última opción se lixivian elementos nutritivos (LM). La ecuación del balance hídrico del suelo se puede formular de la siguiente manera (12, 34):

$$Pr = In + Tr + Es + Pe \pm HS$$

Las condiciones específicas de evaporación y transpiración de los sistemas agroforestales son diferentes, de acuerdo a sus características microclimáticas (temperatura, humedad, viento) las que son influidas por la arquitectura de la vegetación, el sistema radicular, la biomasa de hojas, la actividad fotosintética, etc. determinando una transpiración específica para cada sistema.

Existen pocos estudios parciales o totales sobre el ciclo del agua en sistemas agroforestales. Un primer antecedente al respecto son las investigaciones de Franco e Inforzato (11) en Brasil, quienes determinaron 593 mm/a de evapotranspiración para el monocultivo de *C. arabica* y 1 120 mm/a en la asociación de éste con *Inga edulis*. Poco después, en un estudio a largo plazo hecho en cafetales de Kenia, bajo irrigación, Pereira (24) determinó los siguientes valores para el balance hídrico: lluvia: 973 mm/a, evaporación: 1 532 mm/a, transpiración: 826 mm/a, lixivia-

ción: 131 mm/a. En un estudio integral de agroecosistemas cafetaleros en México, Jiménez (19) determinó varios componentes del balance hídrico, calculando valores de evapotranspiración que alcanzaron 1 327 mm/a en el caso de cultivo al sol, 1 052 mm/a en el cultivo mixto con *Inga jinicuil* (jinicuil), *Inga leptoloba* (chalahuite), naranjo (*Citrus sinensis*) y plátano (*Musa sapientum*), y 703 mm/a bajo sombra de árboles de chalahuite (*Inga leptoloba*). A su vez, Doorenbos y Pruitt (6, 7) consideran que la evapotranspiración en cultivos de café oscila entre 800 y 1 200 mm/a, y la de los árboles de sombra (caducifolios) entre 700 y 1 050 mm/a.

En una investigación reciente, hecha en el sitio donde se realizó el trabajo aquí descrito, Jiménez Otárola (20) determinó valores de distintos componentes del balance hídrico, para un periodo de siete y seis meses, para los sistemas *C. arabica* con *E. poeppigiana* y *C. arabica* con *C. alliodora*, respectivamente. Estos valores fueron:

	<i>C. arabica</i> / <i>E. poeppigiana</i>	<i>C. arabica</i> / <i>C. alliodora</i>
Precipitación total (mm)	1 418.6	1 299.1
Evapotranspiración (mm)	750.0	586.9
Intercepción (mm)	234.4	98.3
Percolación (mm)	308.0	480.0

Dado que los valores mencionados estuvieron basados en los coeficientes de evapotranspiración de Doorenbos y Pruitt (6, 7), los que fueron considerados excesivos, se prefirió efectuar una determinación más precisa la que fue realizada dentro del programa de

Cuadro I. Características de las lluvias en el periodo marzo 1986 – febrero 1987, Experimento Central, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Mes	Total de lluvias		Lluvias entre 10-30 mm/día		Lluvias entre 30-50 mm/día		Lluvias > 50 mm/día		Evaporación tanque A (m)
	Días con lluvia	Precipitación total (mm)	Días	Total (mm)	Días	Total (mm)	Días	Total (mm)	
Marzo 1986	18	217	2	43	0	0	1	116	109
Abril	21	101	2	40	0	0	0	0	99
Mayo	20	124	4	74	0	0	0	0	113
Junio	27	209	4	77	0	0	1	53	80
Julio	28	177	2	47	0	0	1	53	77
Agosto	24	224	3	60	2	65	1	50	77
Setiembre	27	255	6	128	2	80	0	0	93
Octubre	23	226	9	182	0	0	0	0	104
Noviembre	18	138	2	30	2	74	0	0	94
Diciembre	17	55	2	32	0	0	0	0	98
Enero 1987	16	173	1	14	0	0	2	126	95
Febrero	12	44	1	20	0	0	0	0	99
Totales	251	1 949	38	750	6	220	6	400	1 142

estudio de los sistemas agroforestales de *Coffea arabica* asociado con árboles de *Erythrina poeppigiana* (poró) y *Cordia alliodora* (laurel) conducido desde 1977 (1, 9, 15). Así, se originó un estudio completo del ciclo hidrológico y de la lixiviación de nutrientes en estos sistemas, cuyos resultados se presentan en este trabajo.

MATERIALES Y METODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en el Experimento Central del CATIE en Turrialba, Costa Rica, establecido en 1977 y cuyas características han sido descritas en publicaciones anteriores (1, 9, 15).

Variables climáticas

Desde 1949, el CATIE cuenta con una estación meteorológica en funcionamiento, la cual está ubicada

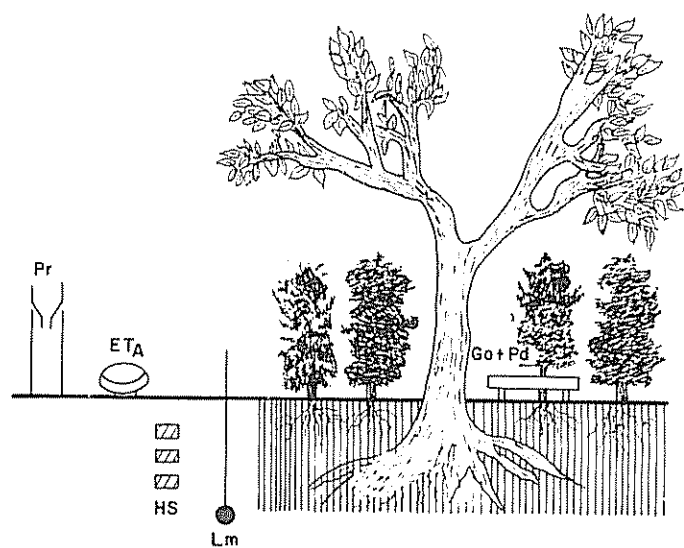
a 2.5 km al norte del Experimento Central, con la misma elevación sobre el nivel del mar (620 m). Para este estudio se consideraron los valores de precipitaciones y evaporación de tanque A, registrados durante cuatro años, entre octubre de 1983 y setiembre de 1987

Variables edáficas

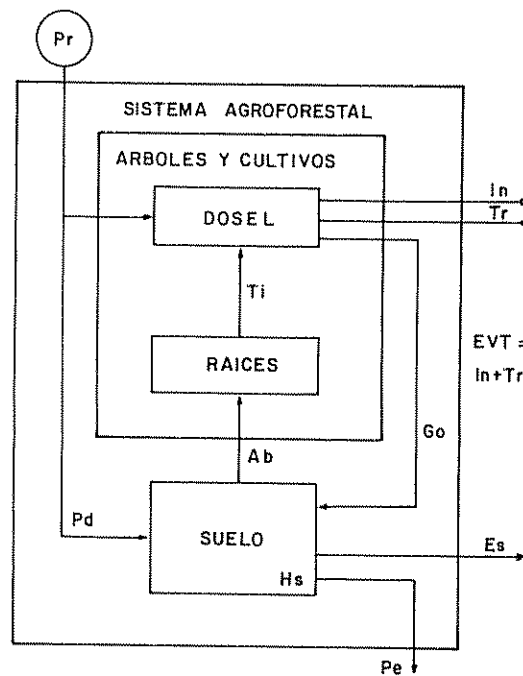
Las principales características de los suelos del Experimento Central han sido publicadas anteriormente (1) Para el estudio del ciclo hidrológico, fueron necesarias otras determinaciones específicas tales como la curva de Pf y la conductividad hidráulica, cuyos valores han sido publicados previamente (18)

Variables hidrológicas específicas de los sistemas

La interceptación se determinó como diferencia entre la lluvia a cielo abierto y el agua que llega al suelo bajo la cubierta vegetal del sistema estudiado Para



- Ab Absorción radicular
- Es Escorrentia
- ET_A Evaporación (tanque clase A)
- EVT Evapotranspiración
- Go Goteo desde las hojas y flujo por el tronco (colector)
- Hs Humedad del suelo (método gravimétrico)
- in Intercepción



- Lm Lixiviación (muestreo con cápsulas lismétricas)
- Pd Precipitación directa al suelo (colector)
- Pe Percolación
- Pr Precipitación (pluviómetro)
- Ti Transporte interno de las plantas
- Tr Transpiración (incluye evaporación desde el suelo)

Fig 1 Ciclo del agua en sistemas agroforestales y medición de sus variables

ello, se utilizaron canaletas construidas con tubos de PVC rígidos, de tres metros de longitud y de 25 cm de diámetro, cortados longitudinalmente por una secante de 15 cm de ancho, resultando así una superficie total de recolección de 0.5 m². Se colocaron cuatro aparatos por sistema en estudio, sobre soportes de madera de 45 cm de altura y con una pendiente constante de 2 por ciento. Durante seis meses (setiembre 1986 a febrero 1987), se realizaron observaciones en 33 eventos de lluvias. Los volúmenes de agua recogidos en los colectores se transformaron en valores de precipitación bajo el dosel, para cada uno de los sistemas estudiados. La interceptación promedio se determinó para cada lluvia y sistema. Con base en estas observaciones, se construyeron gráficos de interceptación en función de la precipitación a cielo abierto. Atendiendo a las consideraciones de los modelos de interceptación de Rutter *et al.* (28, 29), las observaciones de interceptación se ajustaron a una función cuadrática de la precipitación a cielo abierto. En la primera parte de la curva, la interceptación aumenta paulatinamente a medida que se incrementa la precipitación, hasta llegar a un punto máximo, a partir del cual se mantiene constante.

Los datos de interceptación fueron sometidos a un análisis de covariancia con el fin de estudiar el efecto de los sistemas agroforestales sobre la interceptación.

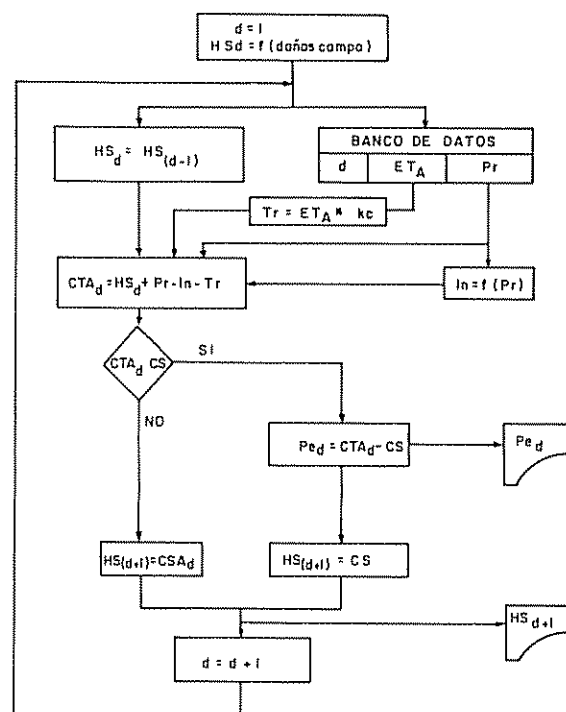
El flujo por los troncos no fue determinado por considerarse que su magnitud es pequeña (16) y su determinación muy costosa. La escorrentía superficial no existió bajo las condiciones del estudio ya que el experimento se estableció en una planicie.

La humedad del suelo fue medida con frecuencia bisemanal (octubre 1983 a marzo 1987), por métodos gravimétricos (10, 12). Las muestras a distintas profundidades (0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm) se obtuvieron usando un barreno de suelos; se tomaron cinco repeticiones por estrato y fecha de muestreo para cada uno de los sistemas en estudio. La profundidad de trabajo se estableció con base en un inventario de biomasa del sistema que incluyó la determinación de la densidad de raíces, hasta una profundidad de 45 cm mediante muestreo por barrenamientos (1). Este trabajo estableció que la biomasa de raíces disminuye notablemente con la profundidad, siendo casi nula su presencia en la capa de 30 a 45 cm. Entonces, se consideró razonable adoptar una profundidad de perfil explorable por las raíces de 90 cm. Sin embargo, es necesario expresar que podrían existir raíces que superen el nivel adoptado, ya que no existe una investigación detallada de los sistemas radiculares existentes en el sitio.

La percolación se calculó mediante un programa de simulación con computadora, empleado previa-

mente en sistemas similares (18). El funcionamiento del modelo formulado es el siguiente (Fig. 2):

- a) Con base en la información de humedad volumétrica, densidad aparente y espesor de las capas de suelo consideradas, se determina el espesor del manto de agua total contenido en el suelo (en mm) en el primer día analizado ($d = 1$).
- b) Se determina la cantidad de agua transpirada y evaporada desde el suelo multiplicando la evapora-



CS	Capacidad de retención del agua del suelo
d	Día
ETA	Evaporación del tanque tipo A
MS _(d-1)	Contenido de agua del suelo al fin del día anterior
MS _(d)	Contenido de agua del suelo al comenzar el día
MS _(d+1)	Contenido de agua del suelo al final del día
CTAd	Contenido total de agua de suelo (variable auxiliar)
In	Interceptación
kc	Constante del cultivo
Ped	Percolación
Pr	Precipitación
Tr	Transpiración (Incluye evaporación del suelo)

Fig. 2. Diagrama de flujo del modelo de cálculo del balance hídrico adaptado de Imbach *et al.* (18)

ción (tanque tipo A) por una constante de cultivo específica del sistema agroforestal en estudio. Se supuso que la transpiración real fue igual a la potencial debido a que el suelo se encuentra permanentemente en capacidad de campo, por debajo de 30 cm de profundidad.

- c) Con base en el dato de precipitación del día analizado y con la función de intercambio de lluvia desarrollada para el sistema en estudio, se calcula la cantidad de lluvia interceptada (en mm).
- d) A la cantidad de agua contenida en el suelo se le adiciona la precipitación del día, y al total, se le deduce la interceptación y la transpiración del día.
- e) Cuando la cantidad de agua remanente (en mm) supera la capacidad total de retención de agua del suelo o capacidad de campo (en mm), el excedente se cuenta como agua percolada (en mm), y se considera que el suelo se encuentra, al final del día, a capacidad de campo.

Cuando la cantidad de agua total es inferior a la capacidad total de retención de agua del suelo, se considera que no hubo percolación y se adopta ese contenido de agua como estado hídrico del suelo al final del día.

- f) Se pasa a los cálculos del siguiente día, siguiendo la misma secuencia de operaciones descrita, y considerando como estado hídrico inicial del suelo en ese día al estado final del día anterior.

Este modelo es determinístico y no incluye efectos aleatorios, por lo que la bondad de sus resultados depende fundamentalmente de una buena estimación de los valores del coeficiente de cultivo (kc), para los cuales no se cuenta con información bibliográfica específica.

Esta circunstancia hizo necesaria una estimación de dichos valores, la cual se efectuó empleando el modelo descrito para generar estimaciones del contenido de agua del suelo, al final del día. Estas estimaciones fueron correlacionadas con el contenido real de agua del suelo calculado con los datos bisemanales de humedad del suelo ya descritos.

Corriendo el modelo varias veces, con diferentes valores de kc (0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0; 1.2), y de capacidad de campo (contenido de agua del suelo a 20 y 33 kPa de tensión) se obtuvieron distintos conjuntos de estimaciones. La estimación mejor correlacionada con los datos de campo permitió seleccionar los valores específicos de kc y de tensión de agua correspondiente a capacidad de campo para el sistema agroforestal en estudio.

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza de los datos de interceptación.

Fuente	GL	Cuadrado medio
Sistema agroforestal	1	66.68**
Precipitaciones (covariable)	26	3.58**
Error experimental	232	1.61

** ($P < 0.01$).

En este modelo, los valores obtenidos de interceptación y de transpiración (incluyendo la evaporación desde el suelo), se sumaron para calcular la evapotranspiración total (EVT).

El egreso de agua del perfil del suelo por percolación fue estimado mediante el modelo descrito, empleando los valores seleccionados de kc y tensión de agua correspondiente a capacidad de campo.

El modelo descrito fue empleado para calcular los valores de los distintos componentes del balance hídrico para el período de cuatro años, empleando la información meteorológica de octubre de 1983 a setiembre de 1987 y con los datos de interceptación obtenidos entre setiembre de 1986 a febrero de 1987. Esto implica que la información de interceptación fue extrapolada al período de cuatro años, sin considerar posibles diferencias atribuibles al crecimiento de la copa de los árboles.

Recolección y análisis de muestras de agua percolada

La solución que contiene los nutrientes lixiviados fue muestreada mediante el uso de cápsulas lisimétricas de 20 mm de diámetro externo y 60 mm de longitud colocadas en el suelo a 100 cm de profundidad, usando ocho repeticiones por sistema agroforestal estudiado. Tanto para la obtención del vacío como para la extracción de la muestra se empleó una bomba de vacío de mano, con un manómetro incorporado para obtener un vacío constante (80 kPa), en todas las cápsulas, a través del período de muestreo.

La toma de muestras comenzó el 15 de marzo de 1986 y se prolongó hasta el 15 de marzo de 1987, cubriendo un período de un año. La frecuencia de muestreo fue semanal.

Las muestras obtenidas se condujeron al laboratorio donde se procedió a unir las muestras semanales en muestras quincenales, efectuándose las determinaciones analíticas en estas últimas. A fin de evitar alteraciones durante la espera, hasta el momento de ser unidas, las muestras fueron almacenadas a -20°C .

Los análisis químicos practicados a las muestras y sus respectivos métodos fueron (5):

- a) Nitrógeno total, por el método de micro-Kjeldahl
- b) Fósforo, colorimétricamente, por coloración de azul de molibdeno con cloruro estañoso, como reductor.
- c) Potasio, calcio y magnesio, por espectrofotometría de absorción atómica.

Dada la elevada variabilidad de los datos recogidos, los mismos fueron transformados (con excepción de los datos de nitrógeno) antes de efectuar el análisis estadístico, empleando la ecuación $y' = \sqrt{y} + 0.5$. Asimismo y dada la existencia de valores perdidos, los datos fueron analizados por medio de un procedimiento de mínimos cuadrados y máxima verosimilitud (14)

En el modelo estadístico empleado para el análisis de los datos de concentración de minerales, se incluyeron varias covariables que procuraban reflejar la posible incidencia del ingreso de nitrógeno con la hojarasca de las plantas, la cantidad de lluvias, la influencia de las podas y de la fertilización y la distancia de los puntos de muestreo a los árboles. Cabe señalar que, dadas las características del manejo agronómico del Experimento Central del CATIE, el efecto de las podas y de la fertilización química estuvo confundido, siendo imposible aislar un efecto del otro.

Lixiviación de elementos nutritivos

El método empleado para hacer esta determinación fue el de muestreo de la concentración de nutrientes en la solución del suelo a 100 cm de profundidad y estimación del volumen de agua percolada mediante el modelo descrito. Este método ha sido considerado como el más adecuado de los existentes para este tipo de trabajo (34) y se ha empleado en trabajos recientes (22). Existen algunos cuestionamientos a esta metodología debido a que solamente se muestrea el agua de los macroporos (31). Sin embargo, Knight *et al.* (22) sostienen que, en condiciones de saturación las concentraciones de las soluciones de los macro y microporos, son similares. Este criterio fue seguido en este trabajo, dadas las características de contenido de agua de los suelos.

Con base en la información de percolación diaria, obtenida mediante el modelo de balance hídrico y en la concentración de los nutrientes en la solución del suelo, a 100 cm de profundidad, obtenida en las diferentes épocas, se calculó la media y la varianza de la masa de nutrientes lixiviados para cada día en que

se produjo percolación. Sumando las pérdidas diarias a lo largo del año se obtuvo: el promedio, la varianza y la desviación estándar de la lixiviación anual de cada nutrimento en ambos sistemas.

Para el cálculo de la lixiviación, en el segundo periodo de observaciones (octubre 1983 a marzo 1987), se usó el valor promedio anual de percolación de agua y la concentración promedio de los elementos nutritivos en las muestras de agua lixiviadas, obtenida durante el único año de muestreo de esta variable.

RESULTADOS Y DISCUSION

Características climáticas

Según la estación agrometeorológica del CATIE, la temperatura media (obtenida sobre cifras de 17 años)

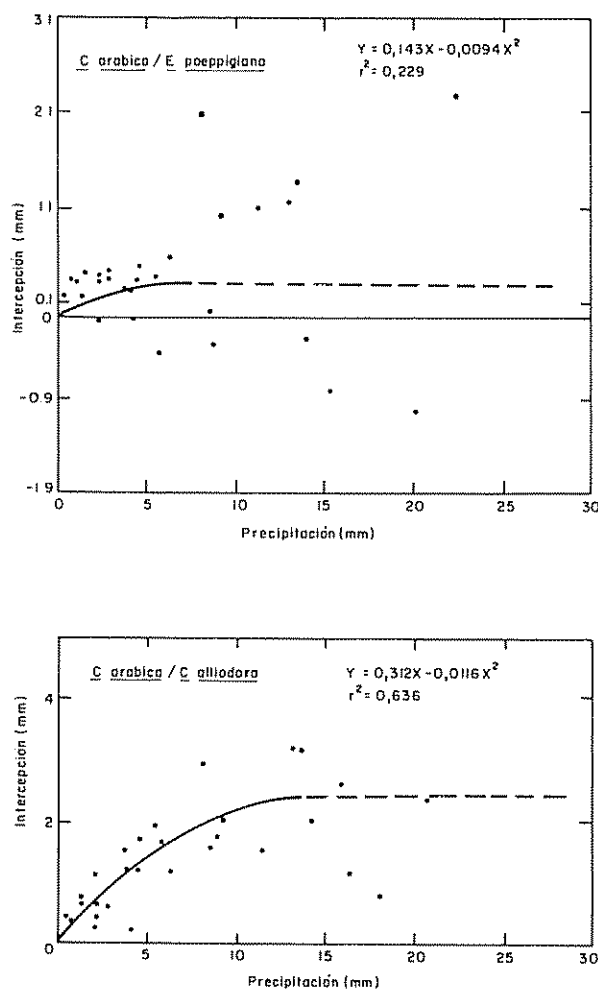


Fig. 3 Intercepción en función de la precipitación

del lugar es de 21.5°C, con una máxima media anual de 26.4°C y una mínima media anual de 18.0°C (20). Asimismo, la precipitación anual promedio (36 años) es de 2 642 mm, con un promedio de 21 días por mes con lluvia superior a 0.1 mm/día. La humedad relativa es elevada, con un promedio anual de 87.5% (17 años). La evaporación promedio anual, medida en tanque tipo A, es de 1 152 mm (20).

El Cuadro 1 muestra, a manera de ejemplo, la información climática mensual de precipitaciones y evaporación del tanque tipo A, obtenida durante un año (marzo 1986 a febrero 1987), en el Experimento Central. Durante este periodo, las lluvias se apartaron de las condiciones promedio del lugar particularmente en los meses de marzo y diciembre de 1986, en los cuales las precipitaciones fueron respectivamente mayores y menores que lo usual. Los eventos pluviosos presentan una distribución particular: sólo un 19.5 por ciento de las lluvias sobrepasaron 10 mm diarios, mientras que los eventos con lluvias mayores a 50 mm diarios, fueron importantes ya que aportaron el 20.5% del total de las lluvias (cinco eventos que totalizaron 400 mm).

El promedio anual de las lluvias en el periodo completo de estudio (octubre 1983 a setiembre 1987),

fue 2 001 mm/a, siendo también inferior al promedio histórico del lugar.

VARIABLES HIDROLOGICAS ESPECIFICAS

Intercepción

Del análisis de la Fig. 3 y de los coeficientes de determinación de las funciones obtenidas, surge claramente la elevada variabilidad de la intercepción en el sistema *C. arabica/E. poeppigiana* en comparación con la del otro sistema (*C. arabica/C. alliodora*). La misma puede atribuirse al manejo del dosel de *E. poeppigiana* que es podado intensamente cada seis meses, eliminándose la totalidad de sus ramas y hojas.

La intercepción máxima estimada fue de 0.6 mm en el sistema con *E. poeppigiana* y de 2.2 mm en la asociación con *C. alliodora*. El análisis de covarianza mostró que la diferencia en intercepción entre ambos sistemas es significativa (Cuadro 2).

Una consecuencia directa de esta diferencia es que el total de lluvia interceptada en el sistema *C. arabica/C. alliodora* es cuatro veces superior al registrado en *C. arabica/E. poeppigiana* (Cuadro 4). El total de precipitación interceptada en cada sistema fue similar en los periodos de uno y cuatro años (Cuadro 3).

Cuadro 3. Balance hídrico anual de los sistemas agroforestales *C. arabica* con *E. poeppigiana* o con *C. alliodora*

	<i>C. arabica/E. poeppigiana</i>		<i>C. arabica/C. alliodora</i>	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)
1 Periodo: 15 marzo 1986 a 15 marzo 1987				
Lluvia	1 923	100.0	1 923	100.0
Intercepción	68	3.5	260	13.5
Transpiración	811	38.7	702	36.5
Evapotranspiración	879	42.2	962	50.0
Percolación	1 044	54.3	961	50.0
2 Periodo: Octubre 1983 a setiembre 1987				
Lluvia: total	8 005		8 005	
anual	2 004	100.0	2 001	100.0
Intercepción: total	280		1 081	
anual	70	3.5	270	13.5
Transpiración: total	3 378		2 922	
anual	845	42.2	730	36.5
Evapotranspiración: total				
anual	3 658		4 002	
	915	45.7	1 001	50.0
Percolación: total	4 347		4 002	
anual	1 086	54.3	1 000	50.0

La intercepción máxima ocurre en la asociación con *C. alliodora* a partir de 15 mm de precipitación, mientras que en el sistema con *E. poeppigiana* sólo son necesarios 8 mm de lluvia para alcanzar la máxima intercepción

El reducido valor de la intercepción máxima en la asociación *C. arabica/E. poeppigiana* (0.6 mm) puede atribuirse tanto al manejo del dosel antes descrito como a las características de las hojas de ambas especies (rugosidad, cerosidad, rigidez, tamaño, arquitectura), lo que hace que retengan poca cantidad de agua en su superficie. Asimismo, los valores negativos de intercepción que se aprecian en la Fig. 3 para este sistema reflejan que, bajo ciertas condiciones, algunos colectores recogieron el agua canalizada hacia ciertos puntos desde áreas del dosel mayores que la superficie del colector. Estos valores individuales y su efecto sobre los promedios de los eventos fueron mantenidos, por considerarse que reflejan aspectos importantes del fenómeno de intercepción en este sistema.

El comportamiento diferente de la intercepción en el sistema *C. arabica/C. alliodora* puede atribuirse a que el dosel de *C. alliodora* no está sujeto a un manejo intenso y su arquitectura y hojas tienen distintas características.

Los resultados obtenidos difieren de los de Jiménez Otárola (16), quien presentó mayores niveles de intercepción en *C. arabica/E. poeppigiana* (16% de la precipitación total) que en *C. arabica/C. alliodora* (8%). Esta diferencia debe atribuirse al sistema especial de muestreo usado por el autor citado y al empleo de es-

timaciones de precipitación bajo dosel en función lineal de la precipitación a cielo abierto. Estas últimas resultan riesgosas puesto que implican aceptar que la intercepción aumenta indefinidamente según se incrementa la precipitación.

Variaciones del contenido de agua en el suelo

En la Fig. 4 se presentan las variaciones del contenido de agua en el suelo durante un año de estudios (5 setiembre 1983 a 3 setiembre 1984). Analizando la Fig. 4, puede verificarse que en la capa superficial (0-15 y 15-30 cm de profundidad), la absorción de agua por las raíces hace que la humedad del suelo disminuye hasta valores correspondientes a tensiones del orden de 200 kPa. Sin embargo, la ocurrencia de lluvias (por ejemplo, entre el 21 de febrero y el 5 de marzo) conlleva un aumento del contenido de agua en esta capa.

Las curvas de humedad en el subsuelo, a profundidades de 30 a 60 cm y especialmente de 60 a 90 cm, muestran que el suelo a estas profundidades está a capacidad de campo (tensión entre 20 y 30 kPa). De esta forma, el agua que percola de las capas superiores se convierte íntegramente en agua freática.

Simulación de la transpiración

La Fig. 5 muestra los resultados de contenido total de agua del suelo (mm) obtenidos con el modelo de simulación, empleando los valores más adecuados de

Cuadro 4. Concentraciones de los elementos nutritivos (mg l⁻¹) en el agua de lixiviación de dos sistemas agroforestales estudiados: 1) *C. arabica/E. poeppigiana* 2) *C. arabica/C. alliodora*

	n	Mínimo	Máximo	Media*	Media*	S**
N	1) 199	0.41	0.75	0.55a	—	0.011
	2) 208	0.41	0.93	0.60a	—	0.011
P	1) 214	0.00	0.22	0.06	0.75a	0.0026
	2) 236	0.00	0.21	0.06	0.74a	0.0025
K	1) 212	0.07	0.36	0.17	0.82b	0.0032
	2) 230	0.08	0.33	0.21	0.85a	0.0031
Ca	1) 215	1.64	3.44	2.15	1.62a	0.021
	2) 236	0.44	1.22	0.69	1.09b	0.021
Mg	1) 216	1.32	2.27	1.52	1.42a	0.019
	2) 238	0.49	1.06	0.76	1.12b	0.013

* Valor retransformado, excepto N

** Valor transformado ($\sqrt{y + 0.5}$), excepto N

Nota: Los promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas ($\alpha = 0.05$)

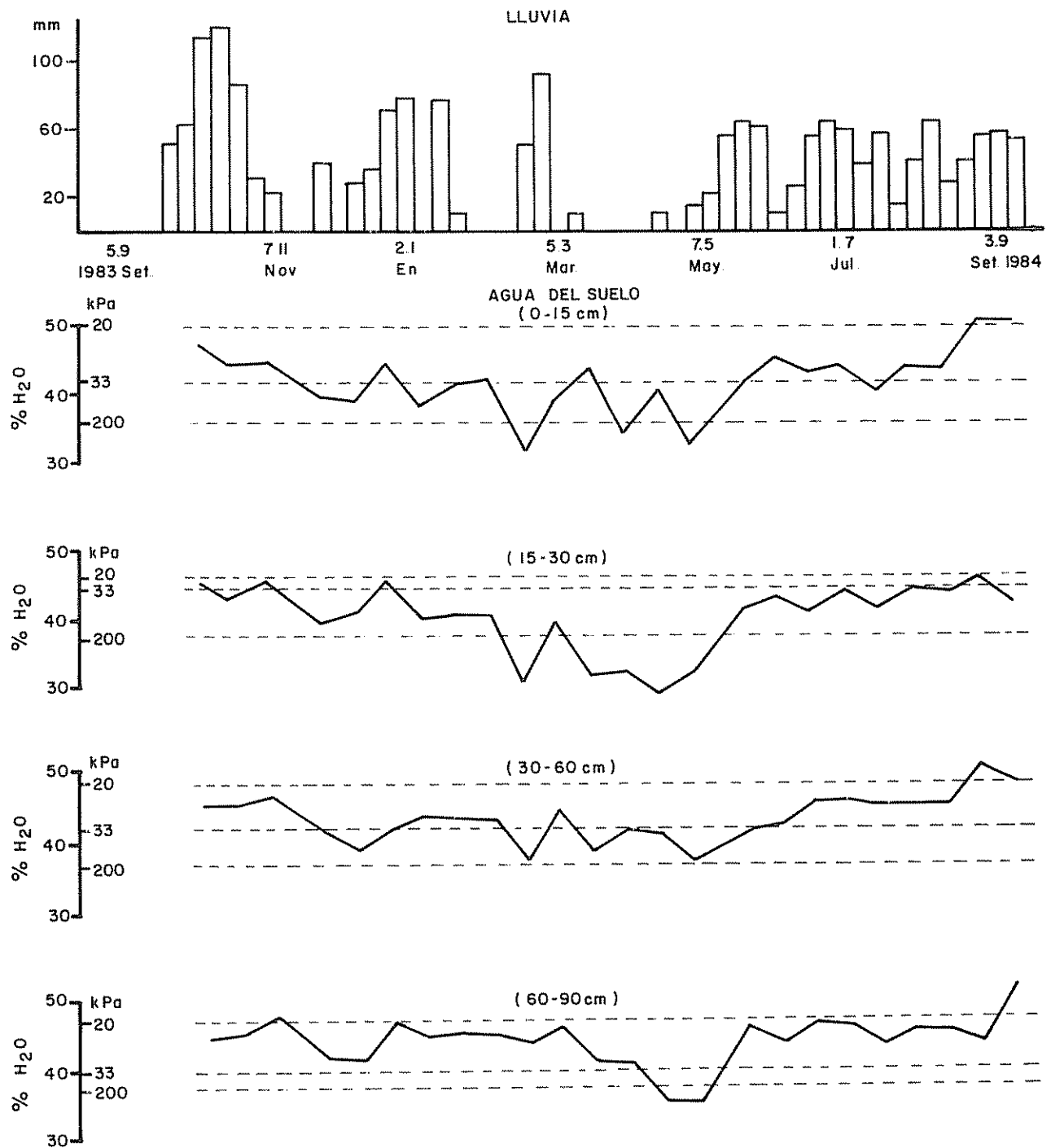


Fig 4 Variación anual de la lluvia y del contenido de agua en el suelo de un sistema agroforestal de café con laurel en Turrialba, Costa Rica

kc y de tensión de agua correspondiente a capacidad de campo para ambos sistemas. Dichos valores fueron:

C. arabica/E. poeppigiana kc: 0.8 Tensión: 0.33 bares

C. arabica/C. alliodora kc: 0.7 Tensión: 0.33 bares

Los coeficientes de correlación entre los contenidos de agua medidos y estimados son buenos (*C. arabica/E. poeppigiana* 0.740 y *C. arabica/C. alliodora* 0.718)

En el período marzo 1986 a marzo 1987, las cantidades absolutas de transpiración fueron diferentes, alcanzando 811 mm/a (42.2% de las lluvias) en el sistema *C. arabica/E. poeppigiana* y 702 mm/a (36.5% de la lluvia) en *C. arabica/C. alliodora* (Cuadro 3). El manejo del dosel superior mediante podas parece tener un papel importante en el balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados. La poda semestral de *E. poeppigiana* origina un aumento de la temperatura y del viento en el estrato del café, lo cual activa la absorción de agua, tal como ha sido señalado por distintos autores (2, 32)

Los valores promedio de transpiración para el período completo de estudios fueron de 845 y 730 mm/a para los sistemas de *C. arabica* con *E. poeppigiana* y con *C. alliodora*, respectivamente (Cuadro 3). La evaporación diaria promedio es, entonces, de aproximadamente 2.3 y 2.0 mm diarios para estos sistemas

Con respecto a los valores citados en la bibliografía, hay coincidencia entre los obtenidos en este trabajo y los presentados por Pereira (24) para Kenia Hay, en cambio, una fuerte diferencia con los resultados de Franco e Inforzato (11) de 1.120 mm/a en *C. arabica* con *Inga* sp. Esta diferencia debe atribuirse al método de trabajo ya que estos autores extrapo-

laron los valores de transpiración de hojas de plantas pequeñas en macetas, al área foliar total de las plantaciones de *C. arabica* asociado con *Inga* sp

Asimismo, existen diferencias con los resultados obtenidos por Jiménez Otárola (20) para los mismos sistemas y lugares, debido a que este investigador empleó valores de kc de 1.3 y 1.2 para las asociaciones con *E. poeppigiana* y con *C. alliodora*, respectivamente, siguiendo indicaciones de la bibliografía (6, 7). Estos valores resultan ser mucho más elevados que los hallados en el presente trabajo, aunque coinciden en señalar una mayor transpiración para la asociación con *E. poeppigiana*.

Evapotranspiración total de los sistemas

Los valores absolutos de evapotranspiración de los dos sistemas estudiados presentan poca diferencia: 915 mm/a en *C. arabica/E. poeppigiana* y 1.000 mm/a en *C. arabica/C. alliodora* (Cuadro 3)

En este comportamiento influyen dos procesos contrapuestos; la intercepción resulta mayor en el sistema con *C. alliodora*, tal como se ha descrito, proceso que se compensa por la mayor transpiración del sistema con *E. poeppigiana*, obteniéndose así valores similares de evapotranspiración total. También resulta importante destacar que las diferencias, en ambos procesos, están ligadas a las mismas causas: el distinto manejo de la copa de los árboles asociados al cultivo y las distintas características de la copa y hojas de ambas especies arbóreas

Percolación

La percolación fue estimada por el modelo en 1.044 mm anuales en el sistema *C. arabica/E. poeppigiana* y 961 mm/a en *C. arabica/C. alliodora*, lo que evidencia que la mayor transpiración del sistema con *E. poeppigiana* fue superada por la mayor intercep-

Cuadro 5. Lixiviación de elementos nutritivos (kg/ha⁻¹ a⁻¹) de los sistemas agroforestales *C. arabica* con *E. poeppigiana* o *C. alliodora*

	Sistemas agroforestales					
	<i>C. arabica/E. poeppigiana</i>			<i>C. arabica/C. alliodora</i>		
	1. Período (marzo 1986-marzo 1987)		2. Período (1983-1987)*	1. Período (marzo 1986-marzo 1987)		2. Período (1983-1987)*
Promedio	s	Promedio	Promedio	s	Promedio	
N	5.79	0.22	6.02	5.61	0.27	6.03
P	0.66	0.15	0.70	0.48	0.10	0.55
K	1.81	0.11	1.84	2.01	0.15	2.15
Ca	27.97	2.68	23.39	7.89	0.71	6.92
Mg	17.81	1.32	16.54	7.17	0.48	7.64

* Valores obtenidos por extrapolación

ción de la asociación con *C. alliodora*, la cual presentó menor percolación en el balance final

Es interesante señalar que en ambos casos, el agua percolada representó aproximadamente la mitad de la precipitación total, lo cual coincide con las estimaciones efectuadas por Russell (26), en sucesiones secundarias próximas al sitio de trabajo

En este punto se debe señalar la posible ocurrencia de sobreestimación de los valores citados de percolación debido a que el balance sólo consideró los primeros 90 cm del suelo en función de los estudios previos de densidad de raíces ya citados. Si existiese esta sobreestimación la misma afectaría también a los valores de lixiviación de nutrimentos

Asimismo, el análisis de la distribución anual del agua percolada muestra que, pese a la inexistencia de una estación seca marcada, en el sitio del experimento, la percolación se concentra entre junio y noviembre (70% del volumen percolado), lo cual coincide con la época de lluvias intensas (15)

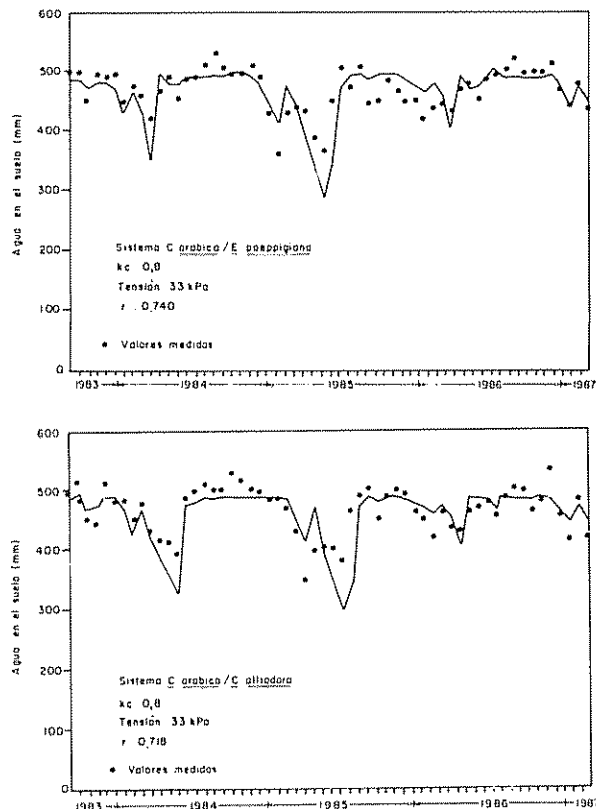


Fig 5 Ajuste del modelo de balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados

Obviamente, los resultados obtenidos no son comparables con los de Pereira (24), debido a que este investigador trabajó bajo condiciones de riego, así como tampoco lo son con los presentados por Jiménez Otárola (20), debido a las diferencias señaladas en los puntos anteriores en cuanto a interceptación y transpiración

LIXIVIACION DE ELEMENTOS NUTRITIVOS

Concentraciones en el agua de lixiviación

Las concentraciones de N y P de los sistemas estudiados no presentan diferencias significativas ($\alpha = 0.05$). Las concentraciones de Ca y Mg son más elevadas (Cuadro 4) en el sistema *C. arabica/E. poeppigiana*, mientras que la de potasio resultó mayor en *C. arabica/C. alliodora*

En la Fig 6 se presentan las variaciones de las concentraciones de N en el agua de lixiviación registradas en ambos sistemas, a lo largo del periodo de estudio. Los niveles las mismas fueron similares en ambos sistemas. El análisis de las covariables consideradas mostró que las variaciones observadas no están relacionadas con el ingreso de N con la hojarasca, la intensidad de las lluvias o la distancia a los árboles. Sin embargo, se registró, una influencia significativa de la covariable poda/fertilización química sobre la concentración de nitrógeno en la solución de lixiviación

Asimismo, la Fig 6 muestra las variaciones estacionales de la concentración de Ca en el agua de lixiviación de ambos sistemas. En este caso, se observó que dicha concentración fue mucho mayor y más variable en el sistema con *E. poeppigiana* que en el sistema con *C. alliodora*. La influencia de las covariables consideradas es similar al caso del nitrógeno, aunque la influencia de poda/fertilización es menos marcada ($0.90 < p < 0.95$). En los restantes nutrimentos analizados no hubo influencia de ninguna covariable.

El hecho de que el ciclaje de importantes cantidades de nitrógeno con la hojarasca del árbol leguminoso (*E. poeppigiana*) no tuvo influencia alguna sobre la lixiviación de minerales es un hallazgo digno de mención

Lixiviación de elementos nutritivos

Las pérdidas de N, P y K en ambos sistemas son relativamente pequeñas, aproximadamente de 6.0 kg/ha/a, 0.6 kg/ha/a y 2.0 kg/ha/a respectivamente (Cuadro 5). Estas pérdidas son de poca importancia en su aspecto agronómico, en particular cuando son comparadas con la fertilización de 80 kg N, 105 kg P_2O_5 y 66 kg K_2O por hectárea y por año

Cuadro 6. Lixiviación de nutrientes en distintos ecosistemas y condiciones ecológicas.

Sistema	Edad (años)	Especies predominantes o lugar	Temperatura media (°C)	PPTAC. anual (mm)	Profundidad de muestreo (cm)
Bosque templado-frío	42	<i>Pseudotsuga</i> sp	9.8	1 360	100
Bosque templado-frío	45	<i>Picea abies</i>	2.2	650	100
Bosque templado-frío	87	<i>Picea abies</i>	5.9	1 063	50
Bosque templado	50	<i>Liriodendron</i> sp.	13.3	1 400	60
Bosque templado-frío	122	<i>Fagus sylvatica</i>	6.1	1 063	50
Bosque templado-frío	80	<i>Quercus-Betula</i>	7.8	1 115	100
Bosque templado-frío	30	<i>Alnus rubra</i>	9.8	1 360	100
Bosque templado-frío	110	<i>Pinus contorta</i>	s.d.	600	100
Bosque tropical	s.d.	Río Negro (Ven.)	26.0	3 500	40
Bosque tropical	s.d.	La Selva (C. Rica)	23.0	3 800	50
Bosque tropical	s.d.	Jari (Brasil)	s.d.	s.d.	s.d.
B. trop. explotado	s.d.	Jari (Brasil)	s.d.	s.d.	s.d.
B. trop. quemado	s.d.	Jari (Brasil)	s.d.	s.d.	s.d.
<i>Pinus</i> sp.	0.5	Jari (Brasil)	s.d.	s.d.	s.d.
<i>Pinus</i> sp.	10.5	Jari (Brasil)	s.d.	s.d.	s.d.
<i>Pinus</i> sp.	15**	Jari (Brasil)	s.d.	s.d.	s.d.
<i>Musa</i> sp. (banano)	s.d.	Costa de Marfil	s.d.	2 040	s.d.
<i>Hevea</i> sp. (hule)	s.d.	Costa de Marfil	s.d.	1 570	s.d.
<i>Oryza sativa</i> (arroz)	s.d.	Filipinas	s.d.	2 000	s.d.
<i>Oryza sativa</i> (arroz)	s.d.	Filipinas	s.d.	2 000	s.d.
Suelo desnudo	s.d.	Colombia	s.d.	2 622	100
Suelo cubierto	s.d.	<i>Indigophera</i> sp.	s.d.	2 622	100
Suelo cubierto	s.d.	<i>Mulch Inga</i> sp.	s.d.	2 787	100
Cacao***	s.d.	Bahía, Brasil	s.d.	606	80
Sist. agroforestal	17	Itabuna, Brasil	s.d.	s.d.	s.d.
Sist. agroforestal	9	Café-poró	21.0	1 923	100
Sist. agroforestal	9	Café-laurel	21.0	1 923	100
Sist. agroforestal	9	Cacao-poró	21.0	1 923	100
Sist. agroforestal	9	Cacao-laurel	21.0	1 923	100

Continuación Cuadro 6. Lixiviación de nutrientes en distintos ecosistemas y condiciones ecológicas.

Sistema	Nutrientos					Fuentes información
	N	P	K kg/ha/año	Ca	Mg	
Bosque templado-frío	0.6	0.02	1.0	4.5	s.d.	Cole y Rapp (4)
Bosque templado-frío	0.9	0.06	2.2	2.3	0.5	Cole y Rapp (4)
Bosque templado-frío	14.9	0.02	2.1	13.5	3.7	Cole y Rapp (4)
Bosque templado	3.5	0.02	8.9	44.5	s.d.	Cole y Rapp (4)
Bosque templado-frío	6.0	0.10	2.9	12.7	3.7	Cole y Rapp (4)
Bosque templado-frío	12.6	0.20	8.3	59.8	6.0	Cole y Rapp (4)
Bosque templado-frío	1.7	s.d.	s.d.	2.2	s.d.	Cole y Rapp (4)
Bosque templado-frío	0.1	0.01	0.9	10.9	4.5	Knight (22)
Bosque tropical	s.d.	14.36-	2.3-	1.1-	0.3-	Jordan (21)
Bosque tropical	4.0	0.00	8.0	8.0	1.3	Mc Coll (1974)*
Bosque tropical	s.d.	0.04	12.7	16.7	8.1	Russell, C. (27)
B. trop. explotado	s.d.	0.08	37.1	39.1	16.1	Russell, C. (27)
B. trop. quemado	s.d.	0.21	199.5	103.7	146.6	Russell, C. (27)
<i>Pinus</i> sp.	s.d.	0.16	89.9	89.9	47.7	Russell, C. (27)
<i>Pinus</i> sp.	s.d.	0.05	9.6	12.1	6.1	Russell, C. (27)
<i>Pinus</i> sp.	s.d.	0.08	9.9	17.5	6.3	Russell, C. (27)

<i>Musa</i> sp (banano)	235.0	s. d.	24.0	256.0	113.0	Chareau (3)
<i>Heyca</i> sp (hule)	79.0	s. d.	63.0	31.0	40.0	Chareau (3)
<i>Oryza sativa</i> (arroz)	2.0	s. d.	16.0	78.0	91.0	Reyes (25)
<i>Oryza sativa</i> (arroz)	11.0	s. d.	60.0	391.0	313.0	Reyes (25)
Suelo desnudo	426.0	0.26	269.3	907.1	273.5	S. de Castro (33)
Suelo cubierto	70.8	0.11	124.5	696.8	238.8	S. de Castro (33)
Suelo cubierto	377.0	0.07	251.9	887.3	355.9	S. de Castro (33)
Cacao***	6.0	0.20	5.0	23.9	5.2	Oliveira (23)
Sist agroforestal	68.0	0.50	2.0	38.0	63.0	Santana (30)****
Sist agroforestal	5.8	0.66	1.8	28.0	17.8	Este trabajo
Sist agroforestal	5.0	0.41	1.8	7.0	6.3	Este trabajo
Sist agroforestal	4.7	0.38	1.3	13.5	16.9	Este trabajo
Sist agroforestal	4.4	0.36	1.0	5.5	4.8	Este trabajo

* datos citados en Fassbender (1984).

** después de 8.5 años de *Gmelina arborea*

*** datos de siete meses solamente.

**** datos citados en Sanchez (1985)

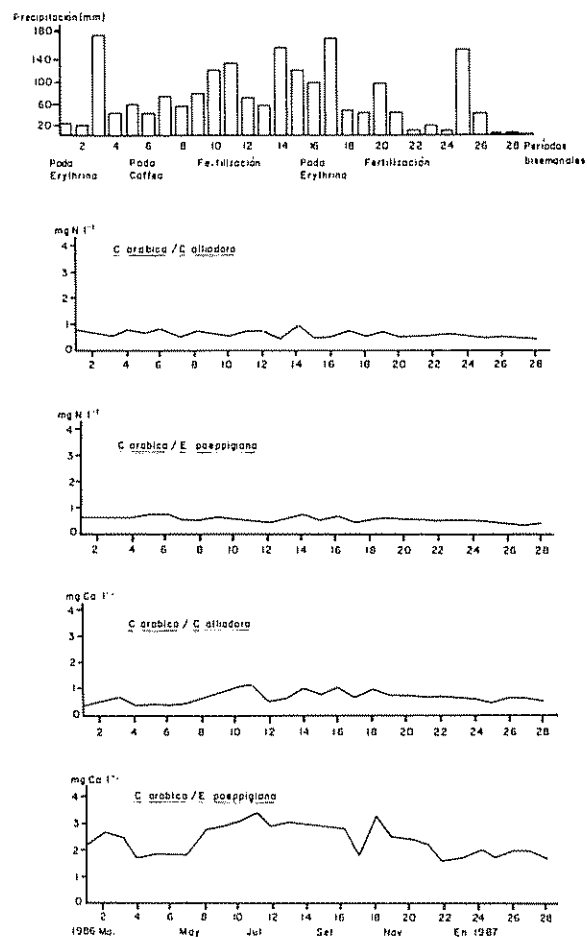


Fig. 6 Variación de las concentraciones de N y Ca en el agua percolada de los sistemas *C. arabica* con *C. alliodora* o *E. poeppigiana*

(1, 7) y las reservas totales de estos elementos en los suelos que fueron de 8 500 kg/ha⁻¹ de N, 2 800 kg/ha⁻¹ de P y 650 kg/ha⁻¹ de K en los primeros 45 cm del suelo (1, 7)

Las pérdidas de Ca y Mg son de mayor magnitud e importancia, especialmente en el sistema con *E. poeppigiana*, ya que ellas cuadruplican los valores registrados en el otro sistema. Sin embargo, comparando las tasas de lixiviación de Ca de ambos sistemas con sus reservas en los primeros 45 cm de suelo (2 835 kg/ha⁻¹ en el sistema con *E. poeppigiana* y 2 783 kg Ca·ha⁻¹ en el sistema con *C. alliodora* (1, 9), se desprende que ellas tampoco son muy graves

De todas las pérdidas observadas, las de magnesio en el sistema con *E. poeppigiana* son las únicas que pueden considerarse como atendibles por su magnitud (16.5 kg/ha/a), ya que implicarían, si todo transcurriese linealmente, que en 35 apos podría agotarse el magnesio de los primeros 45 cm del suelo cuyo valor es de 573 kg/ha⁻¹ (1, 9). Sin embargo y a igual que en el caso del calcio, la reposición de las pérdidas de este nutriente por fertilización en las cantidades citadas no constituye problemas alguno, ni técnico ni económico

En una publicación previa (18), se informó que el ingreso de nutrientes con el agua de lluvia en estos sistemas era de 26.5 kg/ha/a de nitrógeno; 2.8 kg/ha/a de fósforo; 9.6 kg/ha/a; 2.0 kg/ha/a de calcio y 3.5 kg/ha/a de magnesio.

Comparando estos valores de ingreso con las lluvias, con los valores de egreso con el agua de lixiviación (Cuadro 5), se concluye que existe acumulación

de N, P y K y pérdidas de Ca y Mg en los sistemas estudiados

Dado que no se encontraron trabajos similares publicados, se hizo una comparación general con los niveles de lixiviación de otros ecosistemas. Obviamente, esta comparación no tiene validez absoluta, dada las disparidades metodológicas y ambientales pero permite apreciar genéricamente cómo se ubican los sistemas agroforestales con relación a otros sistemas. La

comparación mostró que la lixiviación en los sistemas agroforestales es comparable a la de los ecosistemas forestales nativos o implantados de cualquier latitud y sitio (Cuadro 6).

Esta característica es muy interesante ya que pone de relieve un aspecto positivo muy importante, desde la perspectiva de los sistemas de producción sostenibles y de bajos insumos, como alternativa productiva para los agricultores del trópico.

LITERATURA CITADA

- ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J.; FOLSTER, H.; ENRIQUEZ, G. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba (C.R.) 35(3):233-242.
- BARRADAS, V.L.; FANJUL, L. 1984. La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agroecosistema cafetalero. Biotica (Méx.) 9(4):415-421.
- CHAREAU, C. 1972. Problemes poses par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. Agronomie Tropicale (Francia) 27:905-929.
- COLE, D.W.; RAPP, M. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. In Dynamic properties of forest ecosystems. Ed. by Reichle, D.E. Cambridge, Cambridge University Press p. 341-409.
- DIAZ ROMEU, R.; HUNTER, R. 1978. Metodología de muestras de suelos, análisis químico e investigación de invernadero. Turrialba, C.R., CATIE. 62 p.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. 1984. Guidelines for predicting crop water requirements. Ed. rev. Roma, FAO 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper no. 24).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma, FAO. 194 p. (Estudio FAO: Riego y drenaje no. 24).
- FASSBENDER, H.W. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Turrialba, C.R., CATIE. 475 p.
- FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; HEUVELDOP, J.; ENRIQUEZ, G.; FOLSTER, 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 (C.R.) 35(4):403-413.
- FORSYTHE, W. 1975. Física de suelos. San José, C.R., IICA. 211 p.
- FRANCO, C.M.; INFORZATO, R. 1951. Quantidade de agua transpirada pelo cafeeiro sombreado e pelo Ingazeiro. Bragantia (Brasil) 4(6):121-125.
- GAVANDE, S. 1972. Física de suelos; principios y aplicaciones. México, Limusa. 351 p.
- GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclos hidrológicos y translocación de elementos y químicos con el agua. Turrialba 31:89-99.
- HARVEY, W.R. 1987. Mixed model least-squares and maximum likelihood computer program. Columbus, Ohio State University.
- HEUVELDOP, J.; FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; ENRIQUEZ, G.; FOLSTER, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 35(4):347-355.
- HILLEL, D. 1980. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press. 413 p.
- IMBACH, A.C. 1987. Lixiviación de nutrimentos principales en cuatro sistemas agroforestales con cultivos perennes de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc. Turrialba, C.R., Programa UCR-CATIE. 167 p.
- IMBACH, A.C.; FASSBENDER, H.W.; BOREL, R.; BEER, J.; BONNEMANN, A. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and cacao with poró (*Erythrina poeppigiana*). IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. Agroforestry Systems (Holanda) (en prensa).
- JIMENEZ, E. 1980. Efecto de diferentes estructuras sobre el balance hídrico del cafetal. In Memorias I. Simposio-Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero. Xalapa, Veracruz, México.
- JIMENEZ OTAROLA, F. 1986. Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: café-poró y café-laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa UCR-CATIE. 104 p.
- JORDAN, C.F. 1982. The nutrient balance of an Amazonian rain forest. Ecology (EE.UU.) 63(3):647-554.

22. KNIGHT, D.H.; FAHEY, T.J.; RUNNING, S.W. 1985. Water and nutrient outflow from contrasting lodgepole pine forests in Wyoming. *Ecological Monographs* (EE.UU.) 55(1):29-48.
23. OLIVEIRA LEITE, J. 1984. Perdas de água e nutrientes em uma plantação de cacau do sul de Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (Brasil) 8(3):337-345.
24. PEREIRA, H.C. 1959. Field measurements of water use for irrigation control in Kenia coffee. *Journal of Agricultural Science* 49:459-467.
25. REYES, E.; GALVEZ, N.C.; NAZARENO, N.B. 1961. Lysimeter studies on Lipa clay loam grown to paddy rice. *Philippine Agriculture* (Filipinas) 45: 246-257.
26. RUSSELL, A.E. 1983. Nutrient leaching during large storms in tropical successional ecosystems. M.S. thesis Gainesville, University of Florida. 140 p.
27. RUSSELL, C.E. 1983. Nutrient leaching and productivity in native and plantation forests in Jari Florestal, Para, Brazil. Ph.D. thesis Athens, University of Georgia.
28. RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology* (EE.UU.) 12:367-380.
29. RUTTER, A.J.; MORTON, A.J. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology* (EE.UU.) 14:567-588.
30. SANTANA, M.B.M.; CABALA-ROSAND, P. 1985. Reciclagem de nutrientes em uma plantação de cacau sombreada com eritrina. In *International Cocoa Research Conference* (9, 1984, Lomé, Togo). 1985. *Proceedings*. Lagos, Nigeria, Cocoa Producers' Alliance. p. 205-210.
31. SCHAFER, K.A.; FRITTON, D.D.; BAKER, D.E. 1979. Drainage water sampling in a wet, dual pore system. *Journal of Environmental Quality* (EE.UU.) 8:241-246.
32. SCHROEDER, R. 1951. Resultados obtenidos de una investigación del micro-clima en un cafetal. *CENICAFE* (Colombia) 2(18):33-43.
33. SUAREZ DE CASTRO, F.; RODRIGUEZ GRANDAS, A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Bogotá, Federación nacional de Cafetaleros de Colombia. 473 p.
34. ULRICH, B.; BENECKE, P.; HARRIS, W.S.; KHANNA, P.H.; MAYER, R. 1981. Soil Processes. In *Dynamic properties of forest ecosystems*. Ed. by Reichle, D.E. Inglaterra, Cambridge University Press. p. 265-339.