

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

BALANCE HIDRICO CON ENFASIS EN PERCOLACION DE DOS SISTEMAS
AGROFORESTALES: CAFE-PORO Y CAFE-LAUREL, EN
TURRIALBA, COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa Conjunto
de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de
la Universidad de Costa Rica y el Centro Agronómico Tropical de
Investigación y Enseñanza, para optar al grado de:

Magister Scientiae

Por

FRANCISCO JIMENEZ OTAROLA

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Programa de Producción Vegetal
Turrialba, Costa Rica
1986

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre
Antonio Jiménez Garro

A mi madre
Esther Otárola Herrera

AGRADECIMIENTOS

A Thomas Stadtmüller (M.S.), Consejero Principal, por su interés, colaboración y apoyo en el desarrollo y culminación del presente trabajo.

A José Arze (M.S.) y Roberto Díaz (M.S.), miembros del Comité de Tesis, por sus atinadas sugerencias y colaboración en la revisión de este estudio.

A José Fargas (Ph.D.), miembro del Comité de Tesis, por su amistad, orientación y enseñanzas brindadas en mi vida profesional y de estudiante en el CATIE.

A Jorge Alvarez, asistente de investigación del Proyecto Agroforestal CATIE-GTZ, por su valiosa ayuda en el transcurso de toda la investigación.

A los Drs. Carlos Burgos y Romeo Martínez por permitirme dedicar parte de las horas de trabajo al estudio.

A los Drs. Gilberto Páez y Jorge León por su estímulo constante a mi superación académica y profesional.

A mi compañero y amigo Franklin Herrera por sus muchas horas de estudio, trabajo y amistad que compartimos. Así como a su esposa Rita y a Francillo por todas sus atenciones.

A mi esposa Josefina por su apoyo constante en la realización de mis estudios.

A Rose Mary Garro por su valiosa ayuda en la edición mecanográfica de este trabajo.

A la Agencia Alemana para el Desarrollo (GTZ) por haber financiado este trabajo. En especial a los Coordinadores del Proyecto Agroforestal

CATIE-GTZ, Jochen Heuveloop y John Beer por la colaboración brindada.

Al Proyecto Regional de Manejo de Cuencas, en especial a Roy García, por su ayuda en la preparación de las figuras y ayudas audiovisuales.

BIOGRAFIA

El autor nació en Puriscal, Costa Rica. Realizó sus estudios primarios en la Escuela Rosario Salazar y los secundarios en el Instituto Técnico Agropecuario de Puriscal, donde se graduó de Bachiller y Técnico Medio en Ciencias Agrícolas en 1976.

Sus estudios superiores los realizó en la Universidad de Costa Rica, donde obtuvo el título de Licenciado en Fitotecnia en 1982. Siendo estudiante en esta institución trabajó como profesor de Agricultura en el Instituto Técnico Agropecuario de Puriscal y como instructor de Olericultura y Agrometeorología en la Universidad mencionada.

Desde 1982 labora como agrometeorólogo en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

En 1984 ingresó al Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Convenio UCR-CATIE, obteniendo el grado de Magister Scientiae en Producción Vegetal, en setiembre de 1986.

Esta tesis ha sido aceptada en la forma presente por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, bajo el Convenio UCR/CATIE, como requisito parcial para optar al grado de:

Magister Scientiae

JURADO



Thomas Stadmüller, M.S. Profesor Consejero



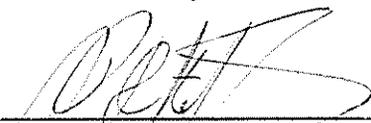
José Fargas, Ph.D. Miembro del Comité



José Arze, M.S. Miembro del Comité



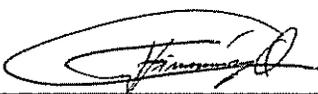
Roberto Díaz, M.S. Miembro del Comité



Director del Programa de Estudios de Posgrado
en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales
UCR/CATIE



Decano del Sistema de Estudios de Posgrado de
la Universidad de Costa Rica



Francisco Jiménez Otárola
Candidato

CONTENIDO

	Página no.
RESUMEN	ix
SUMMARY	xi
LISTA DE CUADROS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xvi
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 El ciclo hidrológico	3
2.2 El ciclo del agua en un sistema agroforestal	7
2.3 El balance hídrico	8
2.3.1 Aspectos generales	8
2.3.2 La ecuación del balance hídrico	9
2.4 Lluvia	10
2.5 Intercepción	12
2.6 Escorrentía por los tallos	13
2.7 Evapotranspiración	14
2.8 El agua en el suelo	19
2.8.1 La humedad	19
2.8.2 Porosidad	21
2.8.3 Retención de agua	22
2.8.4 Movimiento del agua	23
2.8.5 Cambios en el contenido de agua almacenada	25
2.9 Percolación	26
3. MATERIALES Y METODOS	28
3.1 Descripción del área experimental	28
3.1.1 Localización	28
3.1.2 Suelos	28
3.1.3 Clima	29
3.2 Antecedentes del experimento	29
3.3 Manejo del café y los árboles durante la presente investigación	31
3.4 Diseño de la investigación	32
3.4.1 Material experimental	32
3.4.2 Descripción de la unidad experimental	32

3.4.3	Diseño del muestreo	34
3.4.4	VARIABLES EVALUADAS	37
3.5	Métodos utilizados para la evaluación de las variables	37
3.5.1	Ingreso de agua al ecosistema en forma de lluvia	37
3.5.2	Lluvia bajo el dosel	38
3.5.3	Escorrentía por los tallos	38
3.5.4	Contenido y cambio de humedad en el perfil del suelo	38
3.5.5	Percolación	40
3.5.6	Evapotranspiración	41
3.5.7	Capacidad de retención de agua del suelo	42
3.6	Análisis de los datos	42
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	45
4.1	Características del suelo	45
4.2	VARIABLES CLIMÁTICAS	48
4.3	BALANCE HÍDRICO Y PERCOLACIÓN	52
4.3.1	Sistema agroforestal café-poró	52
4.3.2	Sistema agroforestal café-laurel	57
4.4	Humedad del suelo	62
4.4.1	Sistema agroforestal café-poró	62
4.4.2	Sistema agroforestal café-laurel	67
5.	CONCLUSIONES	72
6.	LITERATURA CITADA	74
7.	APENDICE	81

Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas
agroforestales: café-poró y café-laurel en
Turrialba, Costa Rica

RESUMEN

El estudio se llevó a cabo en el Campo Experimental "La Montaña" del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en Turrialba, Costa Rica, durante el período julio de 1985 - enero de 1986. El material biológico consistió en parcelas experimentales de *Coffea arabica* (café) cv. híbrido de Timor asociado con árboles maderables de *Cordia alliodora* (laurel) y con árboles leguminosos de *Erythrina poeppigiana* (poró). Las parcelas experimentales son de topografía plana, fueron establecidas en 1977. El café fue plantado a 1 m entre plantas y 2 m entre hileras. En el poró las distancias de siembra fueron de 3 m entre árboles y 6 m entre hileras, mientras que en el laurel fueron de 6 m entre árboles y 12 m entre hileras.

Los objetivos del estudio fueron: determinar cuantitativamente los componentes del balance hídrico y la variación de la humedad en el suelo, así como determinar la distribución y magnitud de la percolación, en ambos sistemas agroforestales. Las variables evaluadas fueron el ingreso de agua en forma de lluvia al ecosistema, la lluvia que llegó al suelo, la percolación bajo 1,15 m, el contenido y cambio de humedad en el perfil del suelo y la capacidad de retención de agua a diferentes tensiones y profundidades. Además se calculó la evapotranspiración real y la interceptación de agua por el dosel. Para realizar las evaluaciones,

cada sistema agroforestal se dividió en cuatro estratos: a) bajo el árbol, b) bajo el árbol y el café, c) bajo el café, d) entre hileras de café. Las medias por estratos se ponderaron de acuerdo al área ocupada por cada uno de ellos. El diseño de muestreo utilizado fue el estratificado selectivo.

Del total de agua de lluvia que alcanzó el extremo superior del dosel, en el sistema agroforestal café-poró, el agua que llegó a la superficie del suelo representó un 84 %, la intercepción un 16 %, la percolación un 22 %, el cambio de humedad del suelo un 9 % y la evapotranspiración un 53 %. A su vez la percolación constituyó un 26 %, el cambio de humedad del suelo un 10 % y la evapotranspiración un 64 % de la precipitación neta (agua que alcanzó la superficie del suelo). En el sistema café-laurel el agua interceptada representó un 7,5 %, la que llegó al suelo un 92,5 %, la percolada un 37 %, la evapotranspirada un 45 % y el cambio de humedad del suelo un 10 % del total de lluvia que ingresó al sistema agroforestal. A su vez la percolación alcanzó un 40 %, la evapotranspiración un 49 % y el cambio de humedad del suelo un 11 % de la precipitación neta.

Las mayores variaciones de humedad del suelo ocurrieron en los primeros 100 cm de profundidad. En ambos sistemas agroforestales estas variaciones de humedad estuvieron estrechamente relacionadas con la cantidad y distribución de las lluvias a través del período de estudio, aunque, en todo el período hubo agua en el suelo para uso máximo por las plantas.

Palabras claves: Balance hídrico, sistemas agroforestales, café, *Cordia alliodora*, *Erythrina poeppigiana*.

SUMMARY

WATER BALANCE WITH EMPHASIS IN PERCOLATION OF TWO AGROFORESTRY SYSTEMS: COFFEE-PORO AND COFFEE-LAUREL IN TURRIALBA, COSTA RICA

The study was carried out in the experimental station "La Montaña" of the Tropical Agricultural Research Training Center (CATIE) en Turrialba, Costa Rica, from July 1985 to January 1986. Experimental plots of *Coffea arabica* (coffee) c.v. of the Timor hybrid, associated with wood producing trees of *Cordia alliodora* (laurel) and with nitrogen fixing legume trees of *Erythrina poeppigiana* (poro) were utilized for the study. These plots were established on flat terrain in 1977. Coffee was planted at a distance of 1 m between the plants and 2 m between the rows. The poro trees were spaced 3 m between trees and 6 m between the rows, while the laurel were 6 m between trees and 12 m between rows.

The objectives of the study were: quantify the different components of the water balance and the variation of soil humidity, as well as determine the distribution and magnitude of percolation in both agroforestry systems. The variables evaluated were the input of water as rain into the ecosystem total precipitation, the precipitation that reached the soil net precipitation, the percolation below 1.15 m, the amount and variation of humidity in the soil profile and water retention capacity at different tensions and depths. Also, actual evapotranspiration and interception of water by the canopy were calculated. For the purposes of measurement and evaluation, each agroforestry system was divided into four strata: a) under the tree; b) under the tree and the

coffee; c) under the coffee; d) between the rows of coffee. The means of the strata were weighted according to the area of total plot occupied by each of them. A selectively stratified sampling system was utilized.

In the coffee-poro agroforestry system, 84 % of total precipitation reached the soil and 16 % was intercepted; 22 % was percolation, 53 % evapotranspiration and 9 % change in soil humidity. Of net precipitation 26 % percolated, 64 % was lost as evapotranspiration and 10 % was change in soil humidity.

In the coffee-laurel agroforestry system interception represented 7.5 %, net precipitation 92.5 %, percolation 37 %, evapotranspiration 45 % and change in soil humidity 10 % of the total precipitation. Of net precipitation percolation reached 40 %, evapotranspiration 49 % and change soil humidity 11 %.

The greatest variation in soil humidity was found in the upper 100 cm. In both agroforestry systems this variation was clearly related to quantity and distribution of rainfall throughout the study. However, there was always enough water in the soil for maximum use by the plants.

Key words: water balance, agroforestry systems, coffee, *Cordia alliodora*, *Erythrina poeppigiana*.

LISTA DE CUADROS

Cuadro no.		Página no.
<u>En el texto</u>		
1	Porcentaje de los componentes de la evapotranspiración para diferentes coberturas del suelo	15
2	Humedad y densidad aparente del suelo estudiado a diferentes profundidades y succiones	46
3	Cantidad de agua de lluvia (mm) que ingresó al sistema agroforestal café-poró	49
4	Cantidad de agua de lluvia (mm) que ingresó al sistema agroforestal café-laurel	50
5	Balance hídrico decádico en el sistema agroforestal café-poró	55
6	Balance hídrico decádico en el sistema agroforestal café-laurel	58
7	Variación decádica de la humedad volumétrica del suelo (%) en el sistema agroforestal café-poró	63
8	Valores decádicos promedios de la humedad volumétrica del suelo (%) en el sistema agroforestal café-laurel	68
<u>En el apéndice</u>		
1A	Resumen acumulado de datos agroclimáticos. El CATIE, Turrialba, Costa Rica	82
2A	Factores de ponderación de la tensión de agua en el suelo, de acuerdo al área ocupada por cada estrato en el sistema agroforestal café-poró	83
3A	Factores de ponderación de la lluvia de acuerdo al área ocupada por cada estrato en el sistema agroforestal café-poró	84

4A	Factores de ponderación de la lluvia y la tensión del agua en el suelo, de acuerdo al área ocupada por cada estrato en el sistema agroforestal café-laurel	85
5A	Datos meteorológicos obtenidos durante los seis meses anteriores y durante el transcurso de la investigación en la estación agrometeorológica "La Montaña"	86
6A	Cantidad de agua de lluvia (mm) medida en los diferentes estratos de muestreo en el sistema agroforestal café-poró	87
7A	Cantidad de agua de lluvia (mm) medida en los diferentes estratos de muestreo en el sistema agroforestal café-laurel	88
8A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró	89
9A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró y el café	91
10A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el café	93
11A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato entre hileras de café	95
12A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel	97
13A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel y el café	99

Cuadro no.

Página no.

14A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el café	101
15A	Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato entre hileras de café	103

LISTA DE FIGURAS

Figura no.		Página no.
<u>En el texto</u>		
1	Representación esquemática de los procesos más importantes en el ciclo hidrológico	4
2	El ciclo hidrológico visto como un sistema	6
3	Climadiagrama del CATIE, Turrialba, Costa Rica	30
4	Plano general (sin escala) del experimento central de plantas perennes. La Montaña, CATIE, Turrialba	33
5	Diagrama de la ubicación de los sitios de muestreo en el sistema agroforestal café-poró	35
6	Diagrama de la ubicación de los sitios de muestro en el sistema agroforestal café-laurel	36
7	Curvas de retención de humedad del suelo a diferentes profundidades	47
8	Relación entre la cantidad de lluvia que ingresó al extremo superior del dosel del sistema agroforestal café-laurel y la que alcanzó la superficie del suelo	53
9	Relación entre la cantidad de lluvia que ingresó a la parte superior del dosel del sistema agroforestal café-poró, y la que alcanzó la superficie del suelo	54
10	Relación entre la cantidad decádica de lluvia que llegó al suelo y la percolada, después que el suelo alcanzó su capacidad máxima de retención de agua	61
11	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró	65

12	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel	71
----	---	----

En el apéndice

1A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró	90
2A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró y el café	92
3A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el café	94
4A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato entre hileras de café	96
5A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel	98
6A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel y el café	100
7A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el café	102
8A	Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel, estrato entre hileras de café	104

1. INTRODUCCION

La combinación de plantas de café con árboles de *Erythrina poeppigiana* (poró) y *Cordia alliodora* (laurel), constituyen dos sistemas agroforestales bastante usados en Costa Rica, aunque con objetivos diferentes: el laurel es un árbol maderable de crecimiento rápido y alto valor comercial, con el poró se busca maximizar la producción de materia orgánica para mejorar el suelo.

El CATIE, a través del Departamento de Producción Vegetal inició en 1977 un experimento denominado ensayo central de cultivos perennes. Sus objetivos principales eran comparar los sistemas agrícolas de plantas perennes comúnmente usados en la zona y estudiar el ambiente de cada uno de ellos. Dos de los tratamientos establecidos fueron la asociación de café con poró y café con laurel, que constituyen el material biológico del presente estudio.

En ellos se ha realizado investigación sobre la producción y transformación de residuos vegetales. Sin embargo, se carecía de los estudios hídricos que permitieran ir completando la información de la magnitud de las entradas, transformaciones y salidas de esas asociaciones agroforestales, vistas como un sistema. De especial interés es conocer la magnitud de la percolación, para estimar las pérdidas de nutrimentos.

Para conocer el ciclo del agua en un agroecosistema es necesario describir los procesos de transferencia del agua dentro del mismo. Para ello se puede usar el balance hídrico. La determinación del balance hídrico en un sistema agroforestal implica una descripción cuantitativa de todos sus componentes y de sus cambios a través del tiempo.

El conocimiento del balance hídrico es importante, ya que sus componentes son, posiblemente, los que más influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Su distribución y disponibilidad afectan los procesos fisiológicos, morfológicos, bioquímicos y genéticos de las plantas, así como las labores culturales que se realizan a ellas.

Los objetivos del presente estudio fueron: a) determinar cuantitativamente los componentes del balance hídrico y la variación de la humedad en el perfil del suelo, en dos sistemas agroforestales: café-poró y café-laurel; b) determinar la distribución y magnitud de la percolación, a partir del balance hídrico en los sistemas agroforestales mencionados.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 El ciclo hidrológico

El agua, en la naturaleza se presenta bajo diversas formas o aspectos. Sin embargo, hay una secuencia natural del pasaje de una forma a otra que obedece a leyes físicas precisas. Todos estos cambios, movimientos y diferentes formas que afecta el agua en la naturaleza constituye el ciclo hidrológico (44).

En este ciclo el agua se mueve constantemente desde la atmósfera a la tierra, pasa por los ecosistemas -vegetación, animales y suelo- y por la corteza terrestre a los océanos y luego regresa a la atmósfera (20).

El ciclo hidrológico (Figura 1) se asume, comienza con la evaporación a partir de superficies libres de agua. Este vapor asciende a la atmósfera hasta cierta altura donde se condensa para formar las nubes, éstas darán lugar a las precipitaciones bajo sus diferentes formas: líquida, granizada y nevada. Durante el proceso mismo de precipitación, parte del agua vuelve a la atmósfera por evaporación de las gotas de lluvia; sin embargo, la mayor parte llega hasta la superficie de la tierra donde sigue diferentes caminos: parte se evapora inmediatamente desde la superficie del suelo o desde las hojas y tallos de las plantas sobre las que ha caído, parte se infiltra penetrando en el suelo desde donde reaparecerá bajo la forma de manantiales o constituirá las capas de agua subterránea que después pueden ser empleadas por el hombre. Del agua precipitada y que no se ha infiltrado o evaporado, se forman

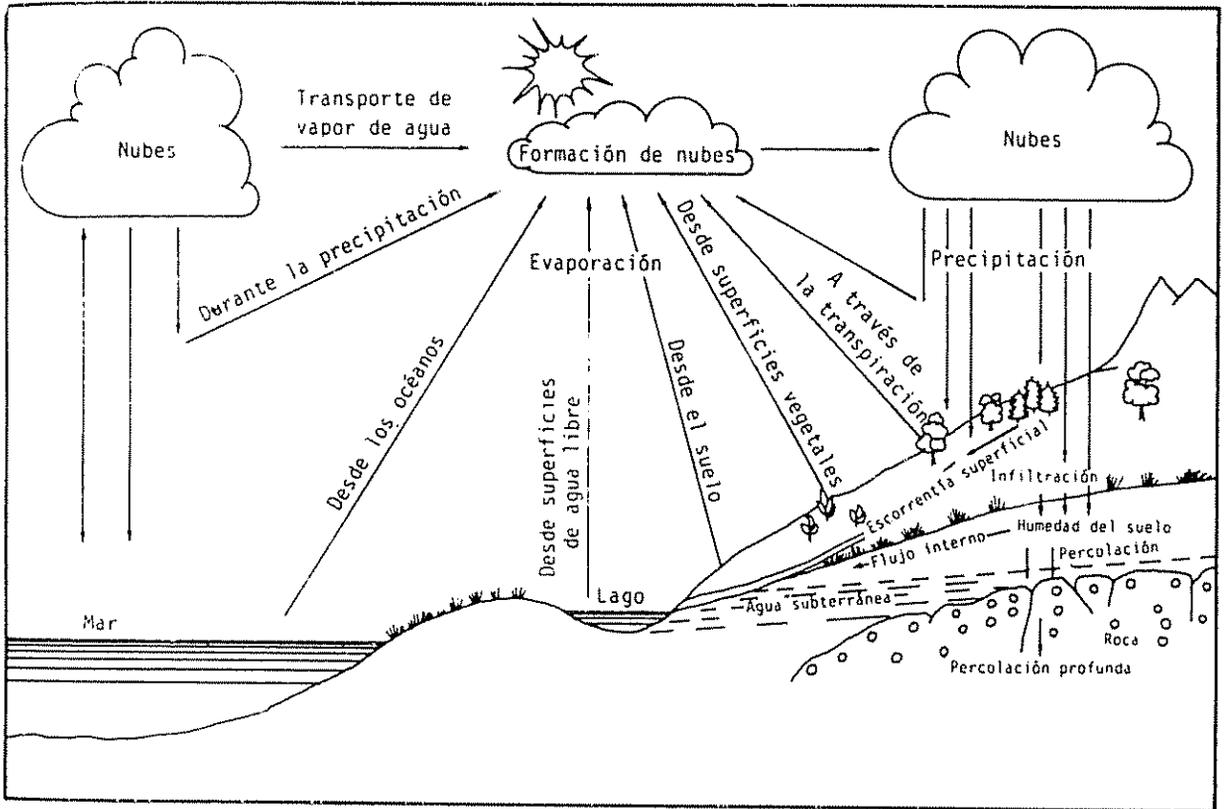


Fig. 1- Representación esquemática de los procesos más importantes en el ciclo hidrológico. (44)

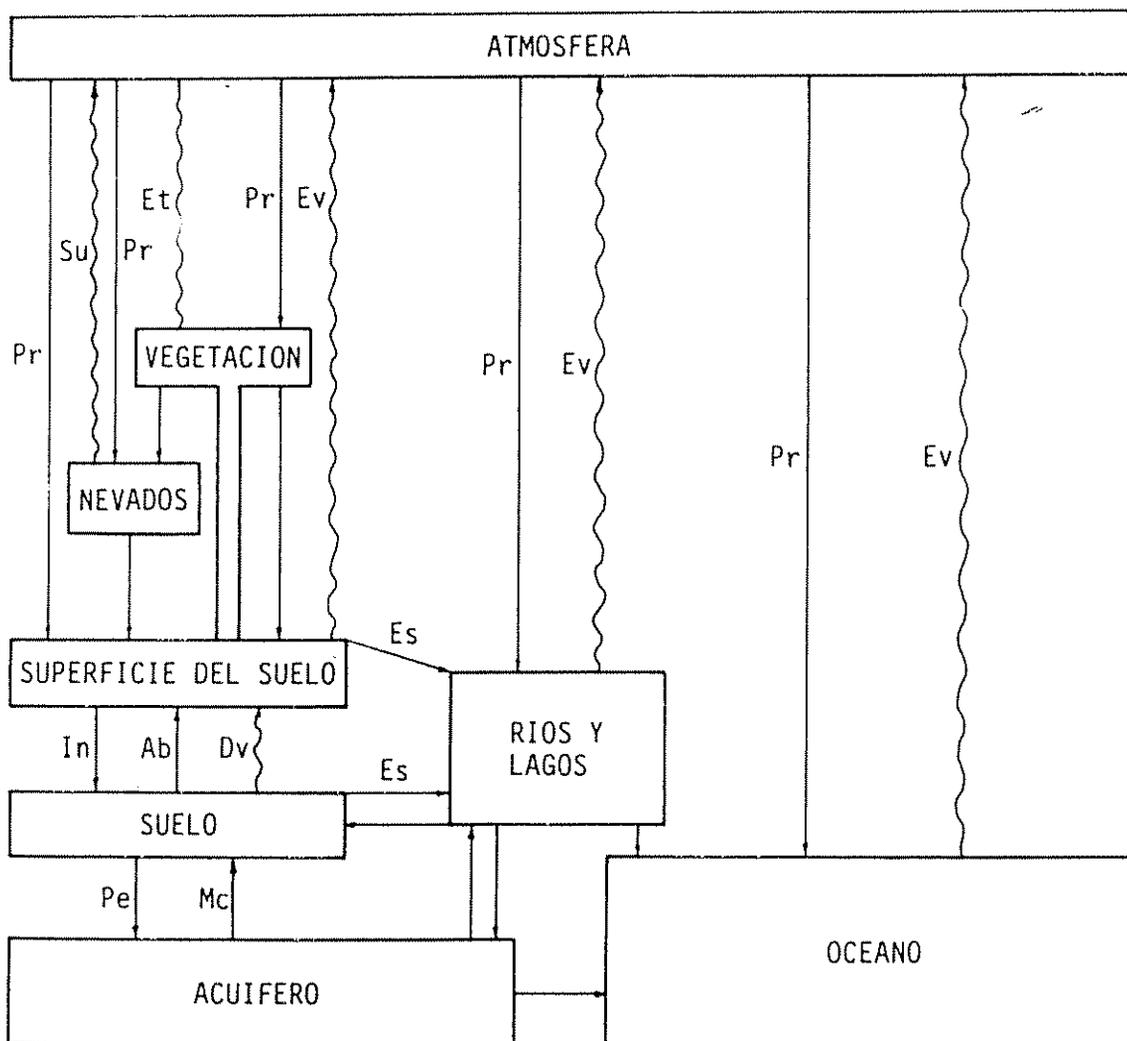
los cursos de agua superficiales, como riachuelos y ríos, los que van a desembocar en lagos, mares y océanos, desde donde comienza nuevamente el ciclo (44).

Por otra parte, el ciclo hidrológico puede visualizarse como un sistema (Figura 2). En este sistema pueden verse los elementos del mismo colocados en recuadro y los diferentes procesos de cambio representado por las flechas cuya dirección indica que son o bien variables de entrada al sistema, o variables de salida desde los mismos.

En la naturaleza existe un determinado equilibrio de este sistema, sin embargo, el hombre puede interferir en cualquiera de los procesos del ciclo hidrológico. Por ejemplo, artificialmente puede estimular la precipitación, reducir la evaporación, provocar cambios en la cobertura vegetal, en las tasas de infiltración y de movimiento superficial del agua, o extraer agua subterránea (31, 44).

El ciclo hidrológico es muy dinámico. Se ha estimado que el promedio de precipitación sobre la tierra es de 100 cm/año y equivale a un volumen total de 413.437 km³. Por otra parte, el contenido de humedad atmosférica total promedio es de 10,520 km³. Esto significa que el agua que constituye la humedad atmosférica tiene que ser reemplazada 40 veces al año aproximadamente, lo que equivale a decir que permanece en la atmósfera sólo algo más de nueve días consecutivos (44).

El ciclo hidrológico es muy importante. El agua es uno de los factores que determina la fisonomía, estructura y riqueza florística de la vegetación, la distribución de los animales y es un factor formador del suelo. Además, el agua desempeña, como solvente universal, un papel imprescindible en la transferencia de sustancias químicas (20).



In	Infiltración	Pe	Percolación
Ab	Absorción	Mc	Movimiento capilar
Pr	Precipitación	Es	Escorrentía
Su	Sublimación	Dv	Difusión vapor
Et	Evapotranspiración	Fu	Fusión
Ev	Evaporación		

Fig. 2 El ciclo hidrológico visto como un sistema.

El ciclo hidrológico recibe su energía por conducto de la luz solar y fuerzas planetarias: el Sol proporciona la energía para la evaporación del agua, el campo gravitacional de la Tierra y la fuerza Coriolis son controles importantes del movimiento de los vientos. Los cambios gravitacionales del Sol y la Luna afectan también el equilibrio de las fuerzas y el movimiento del agua en su ciclo (37, 44, 69). Mediante el ciclo hidrológico se tiene la conexión entre la atmósfera, litosfera e hidrosfera, lo que hace al final posible la vida en la biosfera (20).

2.2 El ciclo del agua en un sistema agroforestal

El agua que ingresa al ecosistema depende de la precipitación y está asociada a la posición geográfica de la región, la circulación planetaria de las masas de nubes y aire, temperatura, vegetación y otros factores. Una parte del agua que ingresa al ecosistema agroforestal es retenida por el dosel de la vegetación, la cual se evapora en función de la temperatura, viento y radiación solar. Otra parte escurre por las hojas y los tallos hasta llegar por gravedad a la superficie de la capa de mantillo del suelo, de donde puede escurrir sobre la superficie del suelo, evaporarse o infiltrarse en este (20).

Parte del agua que se infiltra es almacenada en el suelo y representa la reserva donde las plantas absorben la cantidad necesaria para sus ciclos energéticos y nutrimentales. La mayor parte de esta agua almacenada temporalmente en los tejidos vegetales, pasa a la atmósfera en forma de vapor a través del proceso de transpiración. Cuando el agua que ingresa al suelo sobrepasa su capacidad de retención, percola hacia

la capa freática y egresa del ecosistema (20, 32).

En su paso a través del suelo, el agua transporta nutrimentos, pesticidas y otras sustancias que son lavados fuera de la zona radical. Los nutrimentos aniónicos como los nitratos, cloruros y sulfatos (5) y las bases como el calcio, potasio y magnesio (63) son los más fácilmente lixiviados en el suelo.

2.3 El balance hídrico

2.3.1 Aspectos generales

El balance hídrico, sus elementos y su distribución geográfica es de importancia primordial en muchas actividades humanas; tiene repercusión en los planteamientos y solución de problemas económicos y sociales. La planificación agrícola también se ve beneficiada con el conocimiento preciso del balance hidrológico, debido a que la utilización del agua para su consumo por las plantas entraña problemas de abastecimiento, tanto superficial como subterráneo. Así mismo el estudio de los excesos y deficiencias de agua bajo condiciones de secano, condiciona la posibilidad de conducir con éxito los cultivos (24).

El balance hídrico interesa porque permite definir el período durante el cual la vegetación será probablemente más activa, que corresponde al período real de crecimiento de los cultivos perennes y al ciclo vegetativo de los cultivos anuales (23). Es también de gran importancia en la determinación de necesidad de riego, problemas de contaminación hídrica respuesta de las plantas a variaciones de la humedad del

suelo, estimación del rendimiento de cultivos y con ello predicción de escasez de alimentos, lavado de nutrimentos y plaguicidas, mejorar la eficiencia del uso del agua, adoptar medidas de conservación del suelo, definir épocas de siembra y otras labores culturales (18, 23, 50).

Existen diferentes métodos para calcular el balance hídrico, sin embargo, son pocas las variaciones entre ellos debido a que todos están basados en la misma ecuación. Los métodos más conocidos y generales son el de la FAO (17, 18, 23) y el de Thornthwaite (68). El método de la FAO supone que no hay escurrimiento lateral y que toda la lluvia contribuye al balance hídrico. Este requiere conocer la capacidad de almacenamiento del suelo, el contenido inicial de agua en el suelo, la precipitación y la evapotranspiración potencial estimada. Varios autores (26, 52, 65) han usado esta metodología con ligeras variantes.

El método de Thornthwaite hace dos suposiciones: una presunta capacidad de almacenamiento hídrico en el suelo y una supuesta extracción de esta agua proporcional a la cantidad de agua actualmente almacenada en el suelo. Para aplicar el método se requiere además, conocer la cantidad de lluvia y la evapotranspiración potencial calculada por el método propuesto por el mismo autor.

2.3.2 La ecuación del balance hídrico

El balance hídrico es una expresión detallada de la ley de conservación de la masa, la cual indica que la masa no se crea ni se destruye, solamente cambia de un estado o lugar a otro (4, 32, 66). Es insignificante la cantidad de agua que es formada o descompuesta en

el suelo, por ello su contenido en un volumen definido del perfil del suelo no se incrementa a menos que se adicione agua desde afuera (precipitación, riego), ni disminuye sin que sea transportada a la atmósfera por evapotranspiración, o a las capas más profundas por percolación (32).

Varios autores (3, 20, 32, 34, 62), indican que la ecuación del balance hídrico puede ser escrita como: agua adicionada al sistema (P) más irrigación (I) es igual al cambio en el contenido de humedad del perfil de suelo (ΔH), más la escorrentía (E), más la evapotranspiración (ET), más el drenaje o percolación (D); esto es:

$$P + I = \Delta H + E + ET + D$$

Todas las cantidades son expresadas en términos de volumen de agua por unidad de área (equivalente a unidades de altura o profundidad) durante el período considerado.

En condiciones donde no se aplica riego, el suelo es de topografía plana y existe suficiente mantillo en el suelo que impide la escorrentía, la ecuación se simplifica de la siguiente manera (46):

$$P = \Delta H + ET + D$$

2.4 Lluvia

La lluvia es el elemento climático mejor conocido y en la mayoría de los casos, el que más determina la producción agrícola. Esto se aplica tanto a la cantidad de lluvia recibida anualmente como a su distribu-

ción en las épocas del año (23). Hay tres causas principales de la lluvia, todas las cuales involucran el ascenso y enfriamiento de masas de aire con la subsecuente condensación del vapor de agua (8, 42):

Convectivas: las masas de aire en contacto con la superficie terrestre se calientan y ascienden, penetrando las capas de aire superiores más frías.

Orográficas: el aire es forzado a ascender por las laderas de las montañas, empujado por más aire desde abajo.

Frontales: dos masas de aire con diferentes propiedades físicas se encuentran y una de ellas es forzada a subir, resultando con frecuencia en la formación de nubes.

La lluvia es la forma de precipitación más importante y la única que es ampliamente medida (42). La cantidad de agua de lluvia colectada por un pluviómetro o un pluviógrafo es afectado principalmente por su tamaño y ubicación (14, 23), el viento (23, 42), la evaporación (9, 14, 42) y el salpique (14, 42). Estas características pueden motivar que la cantidad de lluvia medida sea inferior a la que realmente ha precipitado (9, 14, 23, 42). Voronkov (74) indica que en estudios de balance hídrico, bajo coberturas vegetales, la lluvia debe ser medida diariamente y los pluviómetros deben estar en lugares fijos a través de todo el período de observaciones, de modo que los datos registrados varíen solamente con el tiempo.

Hillel (32) indica que es relativamente fácil medir la cantidad de agua adicionada al sistema (P), pero es necesario considerar la posible distribución no uniforme en el área de estudio. Varios autores (30,

41, 76) concuerdan en que, como parte del agua que ingresa al ecosistema agroforestal es retenida por la vegetación (interceptada), se hace necesario medir el agua que llega a la parte superior del dosel y la que finalmente llega al suelo.

2.5 Intercepción

Dabral y Subba (15) definen la intercepción como el proceso mediante el cual la lluvia es retenida por la cubierta vegetal y redistribuida como agua que atraviesa el follaje y alcanza el suelo, agua que escurre por los tallos, agua absorbida y agua evaporada por la vegetación.

Leonard (40), al referirse a la intercepción, indica que hay un período inicial durante el cual la vegetación es humedecida hasta llenar su capacidad de almacenamiento, posteriormente, el exceso de agua gotea del follaje o escurre por los tallos; en este instante, la lluvia que se registra en el interior del bosque tiende a presentar valores similares a los medidos en el exterior, durante el mismo período.

La medición del agua interceptada por la cobertura vegetal se realiza de una manera indirecta. Los valores se obtienen de la diferencia entre la lluvia medida sobre la vegetación o junto a ella y el agua que atraviesa el dosel, más la que escurre por los tallos (30, 42). La cantidad de agua interceptada se puede expresar como una lámina en milímetros (12), o como un fracción de la precipitación total fuera o sobre la plantación (76).

La capacidad de almacenamiento de agua por intercepción es variable; mediciones llevadas a cabo en zonas templadas informan de 1 a 2 mm para

un bosque de coníferas; cerca de 1 mm para rodales caducifolios; desde 0,5 a más de 2 mm para coberturas herbáceas (41, 76). Pocos datos son disponibles para vegetaciones tropicales, aunque se espera que sean del mismo orden (43). Cooper, citado por Leyton (43) informa de 2,5 mm para té. Zambrana (75) en dos bosques tropicales de Turrialba, Costa Rica, encontró que la intercepción fue de 15 y 16 % de la lluvia total del período estudiado.

2.6 Escorrentía por los tallos

Ha sido definida por Manokaran (45), como la parte de la precipitación que es interceptada por la copa de los árboles, concentrada por el follaje y las ramas y encausada por el tallo de las plantas hacia el suelo.

Varios investigadores han demostrado que la escorrentía del tallo es solo una pequeña proporción de la precipitación total. Zambrana (75) informa de valores menores de 1 % para bosques en Turrialba, Costa Rica. Cáceres (12) encontró que, en un bosque muy húmedo en este mismo lugar el escurrimiento de tallos fue solo 0,42 % de la precipitación. Mojica (46), en la Selva, Costa Rica, obtuvo valores de 0,2 %. Debral y Subba (15), en la India obtuvieron valores de 3,6 % para una plantación de *Tectona grandis*. En un bosque húmedo tropical en Malasia, Manokaran (45), informa de un 0,64 %, mientras de Delfs (16) en Alemania informa de valores menores del 1 % para varios tipos de rodales. Varios de estos autores indican que esta medición se puede obviar debido a su poca importancia cuantitativa en relación a la lluvia total.

2.7 Evapotranspiración

La vaporización es la transformación física del agua de su estado líquido al de vapor. Desde la perspectiva agrícola, la vaporización es la emisión de agua en forma de vapor desde el interior de la planta, de la superficie de ésta, y del suelo a la atmósfera circundante (4).

Existen tres términos distintos relacionados con este proceso de emisión de vapor de agua por una plantación (3, 4):

- a) Evaporación (E): este término se aplica al flujo de vapor de agua líquida, superficies húmedas o superficies de elementos que contienen agua.
- b) Intercepción (I): es la vaporización de la precipitación (lluvia, rocío, escarcha, nieve), la cual se deposita temporalmente sobre la superficie de los árboles, hierbas, arbustos y flora del suelo.
- c) Transpiración (T): es la pérdida de vapor de agua por las plantas. Es liberada del interior de éstas a la atmósfera a través de los estomas. Una pequeña parte de esta agua tiene una función directa en el proceso fotoquímico de producción de biomasa.

Según Rode (58), existen pocos trabajos en la literatura que separen la cantidad de agua transpirada por las plantas, la evaporada de la cubierta vegetal y la evaporada del suelo, por lo que usualmente estas cantidades son expresadas en un solo término llamado evapotranspiración (ET). Esta es expresada (3) por la fórmula:

$$ET = E + I + T$$

De acuerdo a Baugartner (4), el aporte individual de los procesos incluidos en el término evapotranspiración es dependiente del tipo de vegetación, y por lo tanto muy variable. Considerando la ET como 100%, este autor presenta el aporte porcentual de éstas, en diferentes clases de cobertura del suelo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentaje de los componentes de la evapotranspiración para diferentes coberturas del suelo.

Cobertura	Evaporación	Intercepción	Transpiración
Bosque	10	30	60
Pradera	25	25	50
Maíz	45	15	40
Suelo desnudo	100	0	0

Entre más alta, densa y exuberante es la vegetación, mayor es el porcentaje de transpiración y menor el de evaporación (4). Así por ejemplo, bajo el dosel de un bosque, donde el suelo está casi siempre cubierto por residuos vegetales, hierbas, musgo y arbustos bajos, la evaporación es insignificante, debido a la reducción de la velocidad del viento y al sombreado (58).

Los factores más importantes que influyen en la intensidad de la evapotranspiración son los siguientes:

- Energía disponible para la vaporización del agua.
- Aportación de aguas a la superficie evaporante.
- Capacidad del aire para el transporte del vapor.

- Tipo de vegetación

La evaporación requiere un consumo de energía (calor latente de vaporización) que procede principalmente de la radiación solar incidente. Otras fuentes son el calor almacenado en el aire o en el suelo y la advección de energía, aunque en última instancia, todo el calor utilizado en el proceso de la evapotranspiración se deriva de la energía solar que alcanza la superficie terrestre (35).

Además de la radiación solar, la cual da un índice de la energía disponible, otros factores meteorológicos que intervienen en la ET son: temperatura, humedad del aire, viento y humedad del suelo. Para que se produzca la evaporación, además, de la energía suministrada por el calor latente de vaporización, es preciso que exista un gradiente de tensión de vapor entre la superficie evaporante y el aire circundante, lo que requiere la existencia de viento o corrientes de convección que renueven el aire sobre dicha superficie (18, 24, 35).

En lo referente al tipo de vegetación, los factores que afectan la transpiración son: el albedo de las hojas; porcentaje de superficie del suelo cubierta por la vegetación; factores morfológicos, tales como el tipo de epidermis de las hojas; clase, distribución, número y tamaño de los estomas; su apertura y cierre en relación con el vapor de agua; difusión de este a través de dichos estomas, y la profundidad de las raíces. Sin embargo, es difícil que la planta pueda ejercer un control apreciable sobre la transpiración con independencia de las condiciones exteriores que la rodean, ya que en último término son éstas quienes controlan el cierre y apertura de los estomas (35, 54).

La evaporación del suelo cuenta también con una serie de factores

que la modifican y entre ellos se pueden citar la textura, la conformación superficial, los microorganismos, su capacidad hídrica, la capilaridad, ciertas sustancias químicas, el color del suelo, la exposición e inclinación del mismo (24, 54).

Rode (58) indica que los valores de ET obtenidos por varios investigadores en campos forestales, agrícolas y praderas, no siempre producen resultados similares. Las pérdidas como ET son altamente dependientes de la masa vegetativa, densidad, condición, localización y productividad de esos campos.

Se debe hacer una distinción entre evapotranspiración máxima (ETM), evapotranspiración real (ETR) y evapotranspiración potencial (ETP). La primera se refiere al caso donde no hay escasez de agua para uso máximo por las plantas; la segunda a la pérdida de vapor de agua de acuerdo a las condiciones reales de abastecimiento hídrico que tengan las plantas; la tercera a la evapotranspiración de una superficie extensa cubierta de hierba verde de 8 a 15 cm de altura y con suministro suficiente de agua (4, 35).

La evapotranspiración está limitada básicamente por la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, por la frecuencia de restitución de esa capacidad y por la duración del período seco. En algunas áreas donde el período de sequía no es muy largo, y la restitución de humedad del suelo es frecuente por medio de la precipitación o el riego, se puede asumir una tasa constante (lineal) de pérdida de la humedad del suelo y la curva de secado del suelo puede ser aproximada por una ecuación lineal simple (77).

Uno de los componentes del balance hídrico más difícil de medir

directamente es la evapotranspiración (7, 32, 66), ya que hay gran cantidad de factores que influyen sobre la misma (24). Debido a esto ha sido necesario recurrir al cálculo de la ET a partir de datos meteorológicos y del cultivo (7, 26, 65), datos meteorológicos, del cultivo y del suelo (13, 17, 53), por diferencia en la ecuación de balance hídrico (4, 7, 13, 32) y mediante mediciones con lisímetros (32, 67, 71).

Uno de los métodos más usados para estimar la evapotranspiración potencial es a partir de los datos del tanque clase A, ya que estos proveen una medida del efecto conjunto de la radiación, el viento, la temperatura y la humedad sobre la superficie del agua. De forma similar el sistema suelo-agua-planta responde a las mismas variables climáticas, aunque algunos factores como la capacidad de reflexión y almacenamiento de calor del agua, variaciones en la turbulencia alrededor del sitio donde se ubica el tanque pueden influir para que hayan cambios en la cantidad de agua evaporada (17, 18). Esto hace necesario el uso de coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque clase A con la ETP. Estos se denominan coeficientes de tanque y están determinados por la humedad, la velocidad del viento y el tipo de cobertura (18).

La estimación de la evapotranspiración potencial a partir de los datos del tanque clase A es de amplia aceptación internacional (17, 18, 54). En países como Estados Unidos, Israel, Puerto Rico, Formosa, México, Hawaii y Cuba, entre otros, es muy usada (54).

2.8 El agua en el suelo

2.8.1 La humedad

La humedad del suelo es dinámica. Varía en el tiempo y en el espacio en respuesta a las fuerzas del movimiento del agua (fuerza de la gravedad, capilar, de absorción), usadas por la percolación, la evaporación, la irrigación, la lluvia, la temperatura y el uso de las plantas (25, 59).

Existen diferentes constantes para describir aspectos particulares de la humedad del suelo (25, 59):

Humedad de saturación: corresponde a la humedad del suelo cuando el agua ocupa toda la porosidad. Este no contiene aire. Los poros grandes son ocupados por el agua gravitacional.

Humedad a capacidad de campo: es la humedad que retiene el suelo contra la fuerza de la gravedad cuando se le deja drenar libremente. En un suelo bien drenado, por lo general se llega a este punto, aproximadamente 48 horas después de irrigar.

Humedad de punto de marchitez permanente: es la humedad debajo de la cual la planta sufre de daños irreversibles causados por la sequía. En ese momento, la fuerza de succión del suelo se equilibra con la fuerza de succión de las células de las raíces.

Gavande (25) señala que hay dos objetivos principales en la medición del agua del suelo:

- a) determinar su contenido de humedad, para calcular el agua que se requiere para restaurar la humedad a la capacidad de campo;
- b) determinar la magnitud del potencial del agua, para tener una medida de la fuerza con que está retenida en el suelo.

Gavande (25) indica que para evaluar completamente las condiciones del agua del suelo es necesario conocer la energía del agua, la cantidad y la forma en que las cantidades están cambiando en relación al tiempo. Estas evaluaciones completas solo se pueden realizar bajo condiciones controladas.

La dificultad de evaluar la cantidad de agua en el suelo se debe, según Gavande (25) y Hillel (32), principalmente al crecimiento disperejo de las plantas; distribución no uniforme de las raíces; diferencia de características de infiltración, variaciones en el campo de la textura, estructura y estratificación del suelo; alteraciones y cambios de densidad aparente, volumen poroso, tamaño de poros e irregularidad de la superficie del suelo.

Los principales métodos directos de medir el contenido de agua en el suelo son: el método gravimétrico, el método de atenuación con rayos gamma, y métodos de dispersión de neutrones (21, 25). Debido a que existe una estrecha relación semilogarítmica entre el contenido de agua en el suelo y su potencial mátrico (21), se puede usar la medición de este último para determinar su contenido de humedad. Para ello es necesario determinar en muestras de suelo no alterado la mencionada

relación y medir el potencial mátrico del suelo por medio de tensiómetros (21, 25).

Richards (56) sugirió el nombre de curvas de sorción o de retención a aquellas curvas que muestran la relación entre el contenido de humedad y tensión del agua de un suelo. Algunos autores (57, 72) proponen una escala logarítmica denominada pF.

Un tensiómetro consiste de una copa porosa llena de agua, enterrada en el suelo a la profundidad deseada y conectada a un manómetro. El agua de la copa alcanza equilibrio de presión con el suelo y se registra la succión matricial. La copa es permeable a los solutos y al agua, pero no al suelo y al aire. La presión del agua dentro del instrumento es menor que la presión barométrica del suelo que se usa como referencia, por lo tanto, el término es negativo y se denomina tensión de la humedad del suelo o succión matricial. Aunque hay varios tipos de tensiómetros, el que usa mercurio es el más exacto y confiable. Para reducir al mínimo la influencia de la temperatura, la presión y la concentración de solutos en el funcionamiento del instrumento, las lecturas de los instrumentos colocados en el campo deben hacerse temprano en la mañana (25, 55, 72).

2.8.2 Porosidad

El suelo consta de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. El agua representa la fase líquida y llena los poros del suelo. Estos tienen diferente tamaño y forma y se clasifican en macroporos, mesoporos y microporos (20, 70). El agua en los macroporos no puede ser retenida

debido a la mayor fuerza de la gravedad en relación a las fuerzas de retención que ejercen las paredes de los microporos por lo que da lugar al agua de percolación. La mayor cantidad de agua disponible se encuentra en los mesoporos; el agua en los microporos es retenida con tal fuerza que no es disponible para las plantas (20).

2.8.3 Retención de agua

Los suelos tienen diferente capacidad de retención de agua en función de sus características fisicoquímicas (20, 61). La estructura, la porosidad, la profundidad, la topografía, la inclinación, la textura, la presión, la temperatura, la matriz del suelo, la densidad aparente, la estratificación, la cantidad de solutos, el espesor de la película de agua y la histéresis del agua del suelo son los factores que más la afectan (23, 25, 32). Un conocimiento satisfactorio del almacenamiento de agua en el perfil del suelo, es importante en el manejo del riego y de muchos problemas hidrológicos; la infiltración, evaporación y percolación, dependen en gran medida del contenido hídrico del perfil del suelo (6).

La capacidad máxima de retención de agua por un suelo se denomina punto de saturación (20). Teóricamente es igual a su porosidad total, pero en la práctica resulta menor debido a que parte de los poros quedan ocupados por el aire (70).

Fassbender (20) señala que el contenido hídrico del suelo se puede caracterizar con la curva de retención del agua. La determinación de ésta se realiza en el laboratorio con muestras no alteradas de

suelo, que se someten a diferentes presiones (entre 0 y 15 bares) y luego se les determina la humedad. Estas determinaciones deben realizarse para diferentes profundidades, según los objetivos del estudio.

2.8.4 Movimiento del agua

Según Gavande (25) el movimiento del agua ocurre cuando hay diferencia de potencial entre diferentes puntos del sistema. El agua tiende a moverse de alto a bajo potencial. Ya que la componente de succión (consistente sobre todo de gradientes matricial, osmótico o termal) puede exceder el componente gravitacional, el agua puede moverse verticalmente hacia arriba y hacia abajo o permanecer sin movimiento, cuando la gradiente de succión balancea la fuerza de gravedad.

Según la naturaleza de los procesos y leyes de la fuerza, pueden reconocerse tres fases del movimiento del agua: movimiento del agua en el interior del suelo, movimiento y drenaje del agua a través de un suelo saturado, y ajuste del agua en suelos no saturados, incluyendo varios efectos osmóticos y térmicos sobre él (25, 32).

El agua que penetra en el suelo proviene de lluvia, irrigación, inundación o filtración de canales de agua. Algunas veces, toda la superficie del suelo está mojada y, otras, sólo parte se encuentra en contacto con el agua.

Si toda la superficie está mojada, el área a través de la cual penetra el agua en el suelo es mayor que cuando sólo una porción de la superficie está mojada y el movimiento será en una sola dirección: vertical hacia abajo. Si sólo parte de la superficie está mojada, el

agua se moverá hacia abajo y lateralmente. Si el suelo está muy seco, el movimiento lateral puede ser, por cierto tiempo, tan grande como el movimiento hacia abajo (25).

Cuando el agua se infiltra en el suelo, llena el reservorio de humedad hasta rebasarlo en cada intervalo sucesivo de profundidad. Por lo tanto, la cantidad de agua que entra en un suelo dado, en cierto tiempo, depende de la cantidad de agua que ese suelo puede almacenar, a la velocidad con que el exceso de agua se transmite a través del suelo húmedo, y al frente de mojadura en contacto con el suelo seco de abajo (25, 32).

El total de agua que entra en un suelo dado es mayor cuando el suelo está seco que cuando está mojado; sin embargo, la velocidad con que el agua avanza a través del suelo es menor cuando el suelo está seco (25).

Hillel (32) indica que el movimiento del agua en el suelo puede ser caracterizado como una secuencia de procesos continuos, cíclicos, sin inicio ni final. Sin embargo, se puede concebir el inicio del ciclo con la entrada del agua dentro del suelo por el proceso de infiltración, continúa con el almacenamiento temporal del agua, y finaliza con su remoción del suelo por percolación, evaporación y absorción por las plantas. Parte del agua de precipitación o riego que llega a la superficie del suelo puede desplazarse horizontalmente antes de infiltrarse (20, 32); ésto se denomina escorrentía superficial (20).

2.8.5 Cambios en el contenido de agua almacenada

La cantidad de agua almacenada en el suelo en cualquier momento es la diferencia entre el ingreso durante el período de tiempo referido y el egreso por percolación y evapotranspiración (77).

Zinke (77) señala que las principales entradas de humedad son la precipitación, riego, rocío, variaciones en el nivel de la capa freática, flujo interno capilar y difusión interna de vapor. Las salidas por su parte, están determinadas principalmente por la evaporación, absorción por las raíces, percolación, escorrentía y flujo interno.

Existen algunas medidas para extender el almacenaje del agua en el suelo por medio de prácticas o estructuras de retención de humedad. De estas, una de las más simples es la reducción de la evaporación y la escorrentía a través de la colocación de cobertura vegetal sobre la superficie del suelo. Esta práctica es más efectiva en regiones de lluvias altas y frecuentes. Un ejemplo de una estructura simple para retención de agua son los amplios montículos de contorno, comúnmente usados en la India (50).

Según Hillel (32) el cambio en el contenido de agua (ΔH) en el perfil del suelo para un período largo es bastante pequeño en relación al balance hídrico total, pero en períodos cortos puede ser relativamente grande, y debe ser medido. Cuando las ganancias de agua exceden las pérdidas, el cambio en el contenido hídrico es positivo; y por el contrario cuando las pérdidas exceden las ganancias, ΔH es negativo.

Rudín (60) analizó matemáticamente los cambios en el contenido de humedad del suelo y las tasas de entrada durante la infiltración

de agua de lluvia. Demostró analíticamente que una lluvia continua, eventualmente resulta en encharcamiento, solamente si la intensidad de la lluvia excede a la conductividad hidráulica del suelo saturado.

2.9 Percolación

El agua de lluvia o de riego, después de saturar las capas más profundas del perfil del suelo, percola hacia los drenajes internos o la capa freática (58, 77). Esta agua percolada es llamada gravitacional debido a la importancia de la gravedad en su movimiento hacia abajo. A alguna profundidad en el suelo siempre existe una capa impermeable; luego de alcanzar ésta, el agua gravitacional se acumula y forma un horizonte de profundidad variable llamado capa freática. Todos los poros de este horizonte están totalmente saturados de agua; ésta puede tener flujo lateral si existe un gradiente de carga hidráulica (58).

De acuerdo a Zinke (77) la percolación ocurre solamente cuando la humedad del suelo a una profundidad dada está por encima de la capacidad de campo. La cantidad de flujo es proporcional a la duración de ese contenido de humedad. También indica que la influencia usual de un bosque es de incrementar la percolación a través del efecto combinado de disminución de la superficie de escorrentía e incremento de la infiltración dentro del suelo.

Uno de los objetivos principales de conocer la magnitud de la percolación es estimar la pérdida de elementos nutritivos y otras sustancias por lixiviación en esa agua. Algunos elementos son muy solubles en el agua del suelo; por ejemplo los cloruros y sulfatos. Otros ele-

mentos como sodio, potasio, magnesio y calcio, pueden retenerse como cationes intercambiables o quedar libres, siendo fácil de perder, si el suelo está sujeto a lixiviación interna (5, 25).

Cuando las aguas de lluvia penetran en el suelo, los elementos fácilmente solubles pasan de las capas superficiales del suelo a las más profundas. De esta manera, el nitrógeno y el calcio se lavan fácilmente, el potasio y el magnesio moderadamente y el fósforo muy poco. El tipo más sencillo de lixiviación es el que afecta a las sales solubles, como los cloruros y sulfatos sódicos que en condiciones húmedas y exceso de lluvia son completamente eliminados del perfil del suelo (5, 25, 63).

El agua que percola bajo determinada profundidad puede ser medida directamente por medio de lisímetros (6, 7, 32), pero en la mayoría de los cultivos perennes y en los bosques resulta una labor altamente difícil y costosa (7). Algunos investigadores (61, 65, 66) los calculan basándose en la capacidad de almacenamiento de agua del perfil; otros (7, 26) por diferencia en la ecuación de balance hídrico.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción del área experimental

3.1.1 Localización

La investigación se llevó a cabo en el Campo Experimental "La Montaña" del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, en Turrialba, Costa Rica, durante el período julio de 1985 - enero de 1986.

Las coordenadas geográficas del CATIE son 9° 53' latitud norte y 82° 38' longitud oeste; la elevación es de 602 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Holdridge (33) la zona corresponde a la formación ecológica de Bosque Muy Húmedo Premontano.

3.1.2 Suelos

Son suelos aluviales, desarrollados sobre una antigua cuenca fluviolacustre. Según Aguirre (1) pertenecen a la serie "Instituto fase normal" y se clasifican en el orden Inceptisol, subgrupo Typic Dystropept.

La topografía es plana. El drenaje original es pobre e imperfecto. El área fue drenada artificialmente con canales abiertos y profundos en 1975. Son suelos de textura franco arcillosa. La fertilidad natural es de mediana a baja; el pH es fuertemente ácido (5,1 - 5,6).

3.1.3 Clima

Según los datos de la estación agrometeorológica del CATIE (36; Cuadro 1A), la precipitación media anual es de 2642 mm, con un promedio de 21 días por mes con lluvia ($>0, 1$ mm). La temperatura media anual es de 21,5 °C, con una máxima media anual de 26,4 °C y una mínima media anual de 18,0 °C. La humedad relativa es alta, con una media anual de 87,5 % y una variación mensual de ± 3 %.

La radiación solar media es de 424 cal/cm²/día y el brillo solar medio es de 4,6 horas por día. La velocidad media del viento es de 4 km/hora y la evaporación media anual medida con tanque estándar tipo A es de 1152 mm.

El diagrama del clima del CATIE en la Figura 3 resume sus características principales.

3.2 Antecedentes del experimento

Esta investigación es parte de un experimento más amplio, desarrollado por el Departamento de Producción Vegetal del CATIE, con la colaboración del Proyecto Agroforestal de la GTZ, denominado "Ensayo Central de Cultivos Perennes". El experimento se inició en agosto de 1977 y fue programado para ocho años de duración; entre sus objetivos se menciona comparar por varios métodos los sistemas agrícolas de plantas perennes usadas en la zona, así como estudiar su ambiente (19).

En el experimento fueron establecidos 18 tratamientos, entre los cuales, los árboles de poró y de laurel fueron combinados con plantas

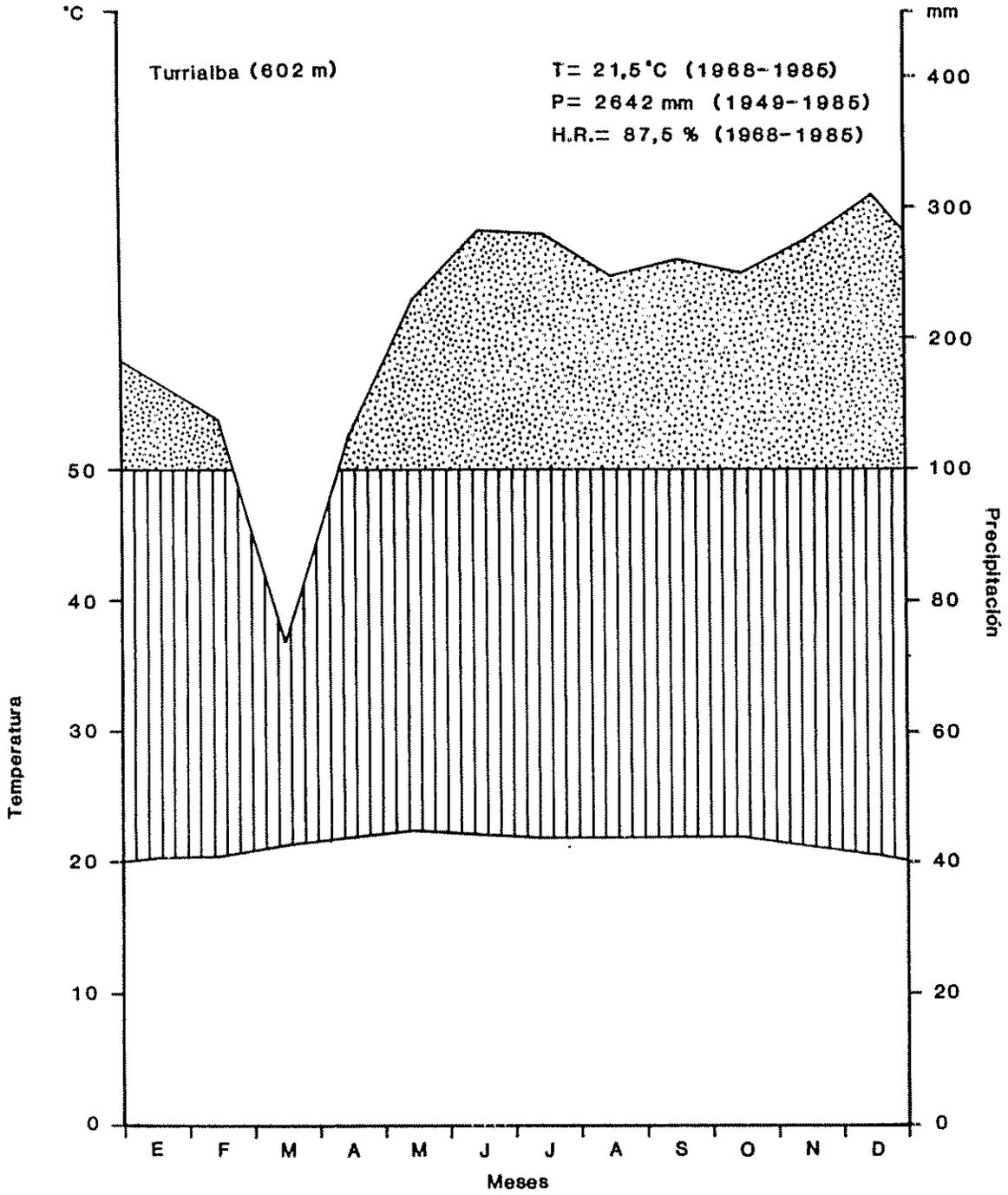


Fig. 3- Climadiagrama del CATIE, Turrialba, Costa Rica

de café, de cacao y con pasto. Los tratamientos laurel-café y poró-café, constituyen la base de esta investigación.

En el sistema café-laurel el cultivar de café utilizado es el híbrido de Timor y se plantó a una distancia de siembra de 1 x 2 metros, lo que corresponde a una densidad de 5000 plantas por hectárea. El laurel está plantado a una distancia de siembra de 6 x 12 m, para una densidad de siembra de 139 árboles por hectárea. En el sistema café-poró se usó el mismo cultivar de café, con la misma densidad y distancia de siembra. el poró utilizado es el *Erythrina poeppigiana*, a una distancia de siembra de 3 x 6 m, para una densidad de 555 árboles por hectárea (2).

3.3 Manejo del café y los árboles durante la presente investigación

El manejo de las parcelas experimentales fue el mismo que se les ha dado durante todo el período de duración del ensayo. Los árboles de poró se podan cada seis meses, practicándose un derrame total. Toda la biomasa podada se distribuye como abono verde en las parcelas. Durante 1985 las podas del poró se realizaron el 4 de febrero y el 1 de julio.

Los árboles de laurel no recibieron ningún tratamiento particular. Toda la biomasa caída naturalmente se deja sobre las parcelas.

El café se podó al finalizar la cosecha. En general, la densidad de follaje del café asociado con poró es mayor que la del café asociado con laurel, debido a que en este segundo sistema, las ramas de café se agotan más rápidamente y requieren por lo tanto podas más profundas.

Se fertiliza con 300, 200 y 150 kg/ha/año de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente, dividido en cuatro aplicaciones.

Al igual que con los árboles, los residuos de ramas y hojas del café se dejaron sobre el suelo.

3.4 Diseño de la investigación

3.4.1 Material Experimental

El material experimental de esta investigación consistió en:

- a) Plantas de café (*Coffea arabica*) cultivar híbrido de Timor, combinados con árboles de poró (*Erythrina poeppigiana*).
- b) Plantas de café (*Coffea arabica*) cultivar híbrido de Timor, combinados con árboles de laurel (*Cordia alliodora*).

3.4.2 Descripción de la unidad experimental

La parcela total efectiva, tanto en el sistema agroforestal café-poró, como en el café-laurel midió 36 x 36 m, lo que resultó en una superficie de 1296 m². De acuerdo al plano de campo del experimento central de plantas perennes (Figura 4) la parcela café-poró estuvo formada por las subparcelas 39 y 40, mientras que la de café-laurel por la 35 y 36. Tanto las parcelas como los árboles y las plantas de café se hallan orientadas en dirección Norte-Sur (19).

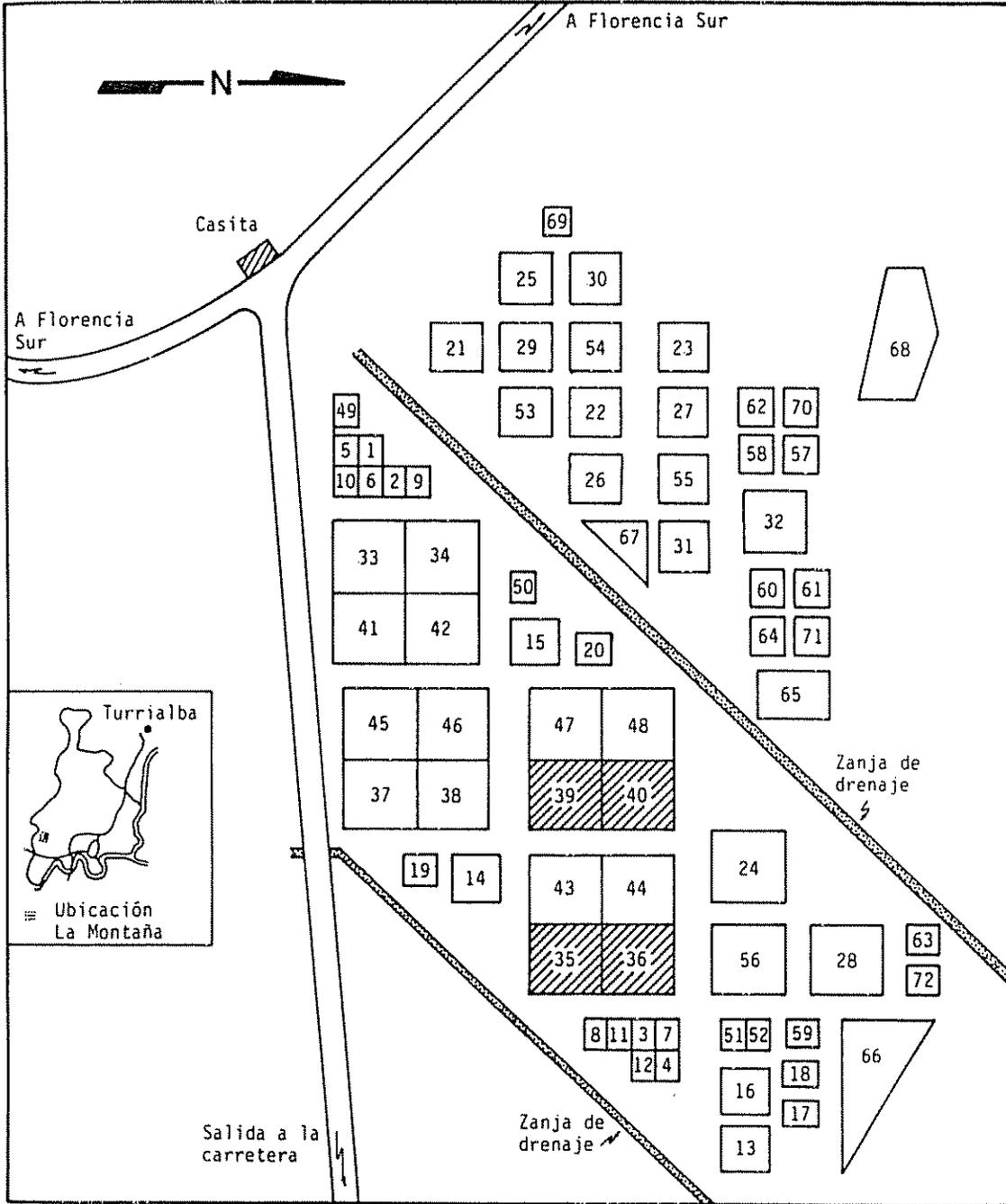


Fig. 4- Plano general (sin escala) del experimento central de plantas perennes. La Montaña, CATIE, Turrialba.

3.4.3 Diseño del muestreo

Se usó el diseño de muestreo estratificado selectivo. La parcela experimental de cada uno de los sistemas agroforestales en referencia se dividió en cuatro estratos:

A. Sistema café-poró

1. Bajo el árbol de poró
2. Bajo el árbol de poró y el café
3. Bajo café
4. Entre hileras de café

B. Sistema café-laurel

1. Bajo el árbol de laurel
2. Bajo el árbol de laurel y el café
3. Bajo café
4. Entre hileras de café

En cada uno de esos estratos se seleccionaron tres sitios fijos de muestreo (muestreo de juicio, según Kish (38)). Los muestreos se realizaron diariamente entre las 07 y 08 horas durante el período que duró la investigación.

Diagramas de los estratos de muestreo en cada sistema agroforestal se presentan en las Figuras 5 y 6.

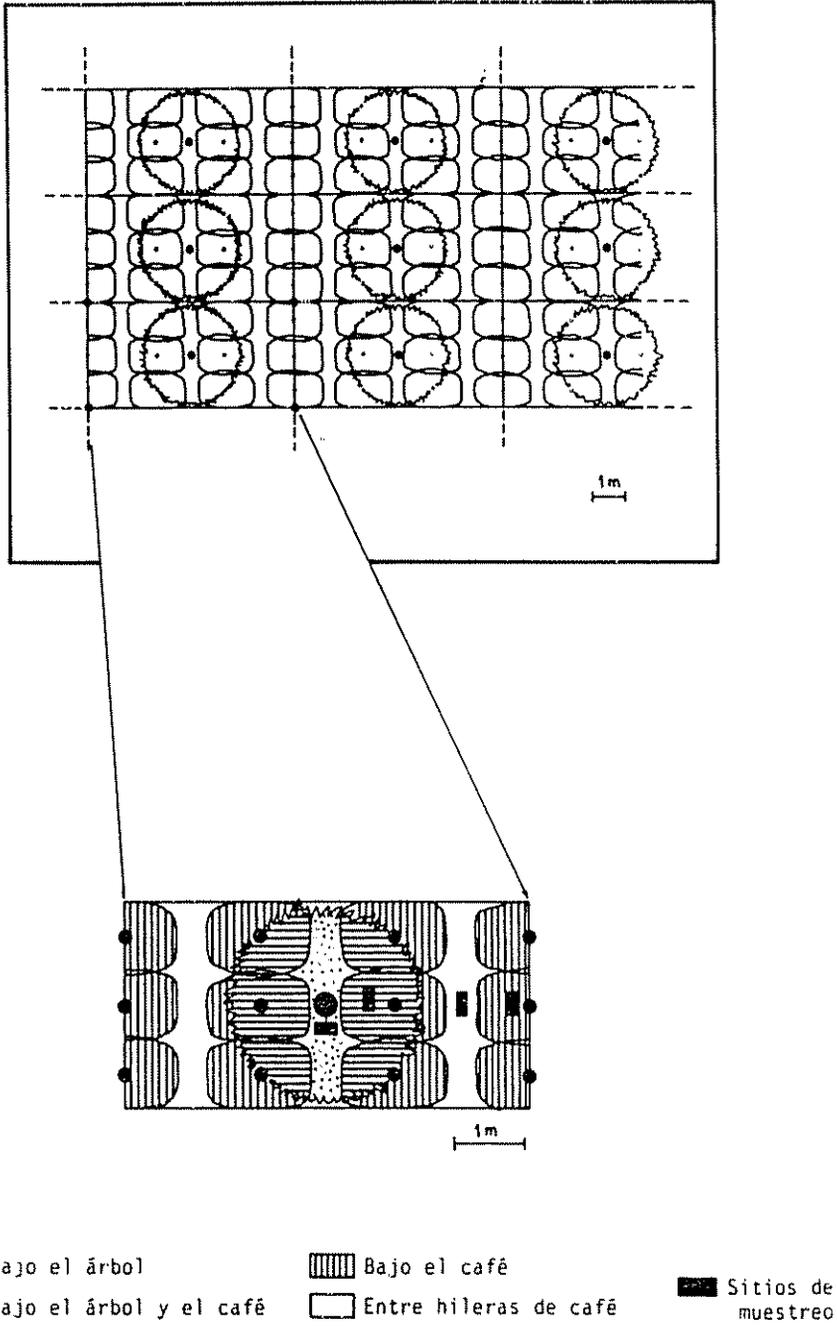


Fig. 5- Diagrama de ubicación de los sitios de muestreo en el sistema agroforestal café-porcó.

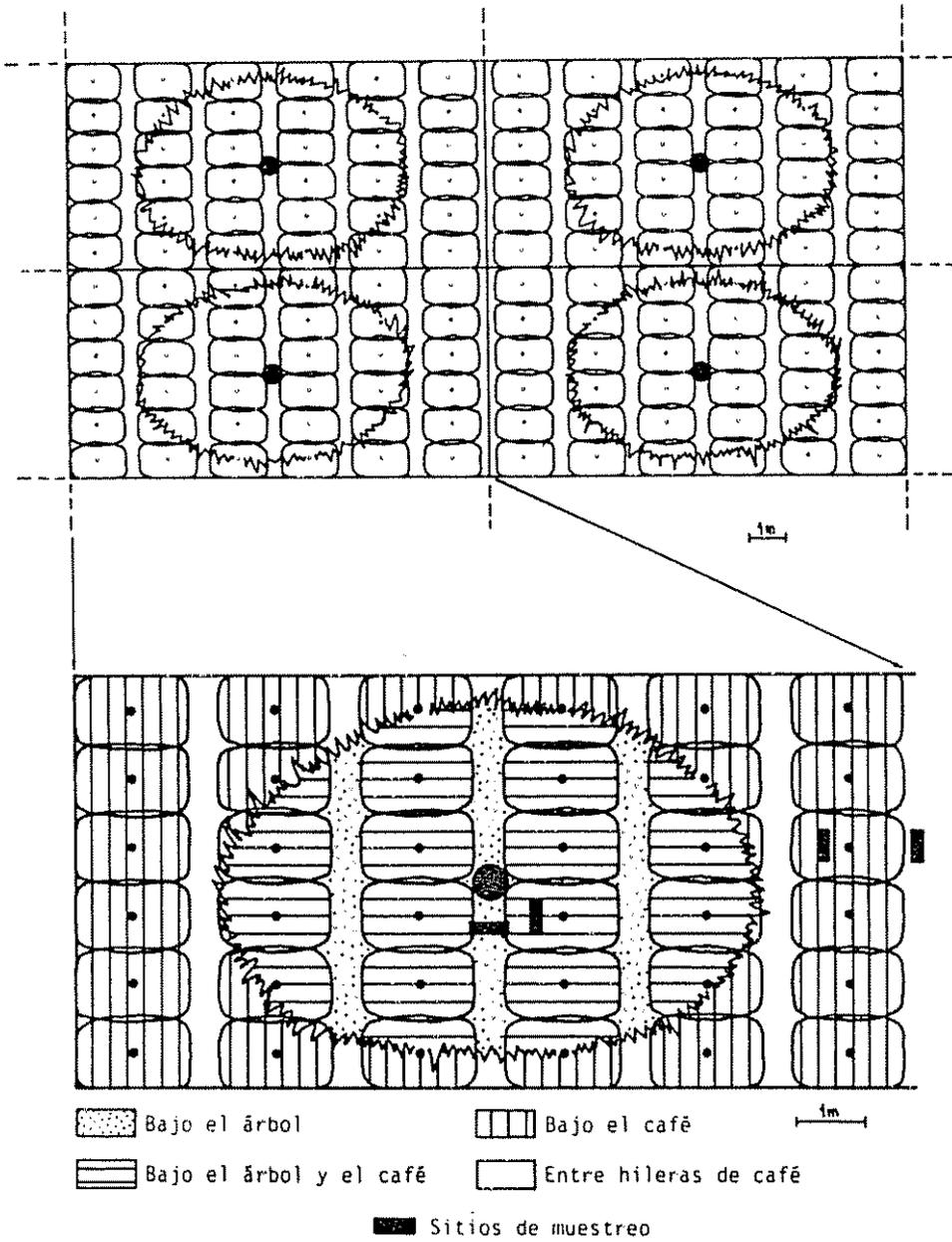


Fig. 6-- Diagrama de la ubicación de los sitios de muestreo en el sistema agroforestal café-laurel.

3.4.4 Variables evaluadas

- Ingreso de agua al agroecosistema en forma de lluvia.
- Lluvia que llegó al suelo.
- Contenido y cambio de humedad en el perfil del suelo.
- Percolación bajo 1,15 metros.
- Evapotranspiración real (calculada a partir de datos meteorológicos y del cultivo).
- Capacidad de retención de agua del suelo a diferentes tensiones y profundidades.

3.5 Métodos utilizados para la evaluación de las variables

Después de la instalación y calibración de los equipos para las mediciones correspondientes, se llevaron a cabo registros durante el período julio de 1985 - enero de 1986, conforme se detallan a continuación:

3.5.1 Ingreso de agua al agroecosistema en forma de lluvia

Se midió con dos pluviómetros de material plástico, equipados con probeta graduada en milímetros. Estos se sujetaron a reglas de madera de un metro de longitud. Se instalaron adyacentes a la parcela experimental en un lugar libre de obstáculos a 0,7 m de altura y fueron nivelados antes del inicio de las mediciones. Con esta medida se determinó la cantidad de lluvia que llegó al extremo superior del

dosel de la vegetación. Otros investigadores (48, 65, 66) han usado esta misma metodología.

3.5.2 Lluvia bajo el dosel

La medición del ingreso de agua al suelo se realizó con pluviómetros plásticos. La superficie receptora del agua estaba ubicada 40 cm sobre el nivel del suelo, debido a que esta altura ha mostrado (48, 52) ser adecuada para evitar efecto de salpique de las gotas e interferencia del viento cuando se hacen las mediciones bajo el bosque. Se colocaron tres pluviómetros por estrato, en sitios fijos. Antes de la instalación definitiva se hicieron pruebas para evitar que quedaran en sitios donde había una gran canalización de agua, debida a la estructura del dosel.

3.5.3 Escorrentía por los tallos

Como se indicó en la revisión de literatura (apartado 2.6) la cantidad de agua que escurre por los tallos es una fracción muy pequeña del total. Considerando además que su medición es bastante costosa, se decidió no realizar la misma en el presente estudio.

3.5.4 Contenido y cambio de humedad en el perfil del suelo

El contenido de agua en el suelo y su cambio durante el período de observaciones, se determinó en función de los valores de poten-

cial hidráulico obtenidos en tensiómetros de mercurio y la curva de pF característica del suelo. Los tensiómetros se instalaron a 15, 45, 75 y 115 cm de profundidad con tres repeticiones por estrato, junto a los pluviómetros. Los huecos para introducirlos en el suelo se hicieron con un muestreador del mismo diámetro del tensiómetro. Previa a la instalación se determinó el potencial gravitacional (cero en agua) de estos instrumentos de acuerdo a la profundidad de ubicación. Mediante la curva de retención de humedad del suelo se calculó la cantidad de agua almacenada a diferentes tensiones y profundidades.

En el caso de los estratos bajo el árbol y bajo el árbol y el café, del sistema agroforestal café-laurel, fue necesario estimar la tensión en la última década de diciembre, ya que los tensiómetros solo miden potenciales hidráulicos menores a 850 mb y durante el período mencionado algunos de estos potenciales fueron superiores a ese valor. Con el fin de obtener un modelo para realizar dicha estimación, se relacionó, para cada profundidad, la tensión de los estratos bajo el árbol y bajo el árbol y el café con la de los estratos bajo el café y entre hileras de café. De los modelos se seleccionaron los que presentaron un coeficiente de correlación más alto.

Para estimar la tensión en el estrato bajo el árbol de laurel a las profundidades de 0 a 30, 30 a 60 y 60 a 90 cm, respectivamente, las funciones obtenidas fueron las siguientes:

$$y = -67,364 + 2,213X \quad r = 0,84$$

$$y = -211,482 + 4,043X \quad r = 0,94$$

$$y = -192,377 + 4,960X \quad r = 0,90$$

X = tensión entre hileras de café

y = tensión bajo el árbol de laurel

Las funciones obtenidas para las mismas profundidades para estimar la tensión, en el estrato bajo el árbol de laurel y el café fueron:

$$Y = -54,740 + 2,587X \quad r = 0,87$$

$$y = -165,124 + 3,861X \quad r = 0,84$$

$$y = -229,241 + 5,761X \quad r = 0,84$$

y = tensión bajo el árbol de laurel y el café

X = tensión entre hileras de café

3.5.5 Percolación

Se determinó de acuerdo a la consideración siguiente: cuando el agua que ingresa al suelo más la contenida inicialmente en el perfil, excede la capacidad de almacenamiento del suelo a una profundidad determinada, el exceso de agua es considerado como percolada. La capacidad máxima de retención de agua del suelo se determinó, sometiendo las muestras no disturbadas a una tensión de cero bares y haciendo luego la determinación de humedad de éstas. Con base en ello se calculó la lámina de agua existente a diferentes profundidades. La humedad que inicialmente tenía el suelo se estimó a partir de la curva de retención de agua (Ver 3.5.7).

3.5.6 Evapotranspiración

Para calcular la evapotranspiración se usó el procedimiento de la FAO (17, 18). El mismo consiste en calcular el dato que denominan evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}); para esto se multiplica el valor de evaporación medido en el tanque clase A por un factor denominado coeficiente de tanque, el cual depende de la humedad relativa, la velocidad del viento, la cobertura que rodea al tanque y la distancia a barlovento de esa cobertura de cada lugar. Para el sitio en estudio, de acuerdo a las condiciones antes mencionadas, el coeficiente de tanque que le correspondió fue 0,85.

El siguiente paso fue calcular la evapotranspiración máxima (ETM). Para ello, se multiplicó la E_{To} por un coeficiente de cultivo. Doorembos y Pruitt (18) indican que para plantaciones de café cultivados bajo protección de árboles de sombra se pueden usar coeficientes de cultivo entre 1,2 y 1,3 para períodos húmedos. En el presente estudio los coeficientes usados fueron 1,3 para la asociación café-poró y 1,2 para café-laurel, ya que en este último la cobertura es menor que en el café-poró.

Los valores de evapotranspiración máxima obtenidos mediante el cálculo anterior, se consideraron equiparables a la evapotranspiración real, debido a que con buen suministro de agua en el suelo, la tasa real de evapotranspiración es igual a la evapotranspiración máxima, donde la ETM para un cultivo dado, viene determinada por la demanda evaporativa del aire (17, 18, 54, 59). Además algunos autores (17, 18) indican que para cultivos con una evapotranspiración máxima entre 3 y 4 mm/día

puede agotarse como mínimo un 35 % del total de agua disponible en el suelo sin que la evapotranspiración real llegue a ser inferior a la máxima. El agua disponible la definen como la contenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

3.5.7 Capacidad de retención de agua del suelo

La curva de retención de agua (pF) del suelo fue determinada en muestras no disturbadas, tomadas con anillos metálicos y determinadas bajo una succión (potencial mátrico) de 1, 10, 50, 100, 330, 500 y 1000 milibares. Para las tensiones de 1, 10, 50 y 100 mb se usó el método del plato de succión, mientras que para los 330, 500 y 1000 el del plato de presión de acuerdo a la metodología de Forsythe (21).

La densidad aparente se determinó para cada succión y profundidad por medio del método de cilindro de volumen conocido (21). Los análisis se realizaron en el laboratorio de física de suelos del CATIE.

3.6 Análisis de los datos

Cada población completa (sistema agroforestal café-poró y sistema agroforestal café-laurel) se dividió en cuatro estratos. Para cada estrato se obtuvo diariamente una muestra promedio, a partir de las tres repeticiones, o sea, se obtuvo para cada estrato un promedio diario de la lluvia que ingresó a la superficie del suelo y de tensión del agua del suelo a 15, 45, 75 y 115 cm de profundidad.

Las medias por estrato se ponderaron de acuerdo al área de la parcela total que cada uno incluía, para formar una estimación combinada de la población completa. Los factores de ponderación usados se incluyeron en los Cuadros 2A, 3A y 4A.

Debido a que los árboles de poró fueron podados antes del inicio de las observaciones, la ponderación en el sistema agroforestal café-poró fue dinámica en el tiempo. Para ello, se hicieron mediciones en diferentes etapas del estudio, del largo y ancho de tres secciones equidistantes de la copa de los árboles de poró y de las plantas de café. El promedio de esas mediciones se representaron sobre un plano a escala de la parcela, a partir del cual se determinó el área porcentual promedio que cada estrato ocupaba en relación a la parcela total, en las distintas épocas.

Para la asociación café-laurel, el procedimiento de ponderación fue similar, solo que se realizó en una sola época, porque el laurel no se podó y la época del estudio no correspondió al período de caída de sus hojas.

Con las medias ponderadas de tensión se obtuvo la humedad volumétrica del suelo a cada profundidad mediante el uso de las curvas de retención (pF). Para cada década (período de 10 u 11 días) se obtuvo un valor promedio de humedad del suelo para los diferentes intervalos de profundidad (0 a 30, 30 a 60, 60 a 90 y 90 a 120 cm), y una suma total de la lluvia que llegó a la parte superior del dosel y la que alcanzó la superficie del suelo. Los cálculos de evapotranspiración, cambio de humedad en el suelo, contenido de agua en suelo, percolación e intercepción se hicieron también para períodos decádicos.

El grado de asociación entre las variables se estudió mediante análisis de correlación y regresión.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Características del suelo

En el Cuadro 2 se presentan los resultados del análisis del suelo para determinar la humedad gravimétrica y la densidad aparente a las diferentes profundidades y succiones. Se nota que cuando la succión es de cero milibares (saturación), existe poca variación en la humedad gravimétrica hasta 90 cm de profundidad, y disminuye considerablemente en la capa del perfil del suelo ubicada entre 90 y 120 cm de profundidad. Sin embargo, al aumentar la succión a que son sometidas las muestras, el efecto anterior se hace menor.

La densidad aparente se incrementa levemente a una misma profundidad cuando aumenta la tensión; esto se debe a la presencia de arcillas expandibles en la composición textural de este suelo. La capa de suelo de 90 a 120 cm de profundidad es la que presenta mayor densidad aparente. Debido a que el contenido de humedad volumétrica, y con ello la capacidad de retención de agua a las diferentes succiones y profundidades, es determinado por el producto aritmético de la humedad gravimétrica y la densidad aparente, la capa de suelo de 90 a 120 cm de profundidad es la que presenta mayor capacidad de retención de agua (Figura 7). En esta figura, se nota también, que existe un alto coeficiente de ajuste (R^2) de las curvas de tensión con la humedad volumétrica (pF) al modelo semilogarítmico ($y = a + b \ln x$), lo cual coincide con lo mencionado por Forsythe (21).

Los resultados obtenidos de humedad gravimétrica y volumétrica,

Cuadro 2. Humedad aparente del suelo estudiado a diferentes profundidades y succiones.

Succión (mb)	PROFUNDIDAD (cm)											
	0 - 30			30 - 60			60 - 90			90 - 120		
H.G.* (%)	D.a (g/cm ³)	H.V. (%)	H.G. (%)	D.a. (g/cm ³)	H.V. (%)	H.G. (%)	D.a. (g/cm ³)	H.V. (%)	H.G. (%)	D.a (g/cm ³)	H.V. (%)	
0	59,30	1,010	59,89	59,80	0,990	59,20	61,40	0,970	59,56	56,20	1,070	60,13
10	52,84	1,020	53,90	51,12	1,000	51,12	51,54	0,980	50,51	50,56	1,080	54,61
50	46,31	1,030	47,70	45,03	1,010	45,48	44,25	0,990	43,81	46,32	1,090	50,49
100	43,95	1,035	45,49	42,12	1,015	42,76	41,70	0,995	41,49	44,83	1,095	49,09
330	40,68	1,040	42,31	40,84	1,020	41,66	39,65	1,000	39,65	42,63	1,100	46,89
500	39,27	1,044	41,00	39,03	1,024	39,97	38,56	1,004	38,71	39,80	1,104	43,94
1000	36,57	1,048	38,32	38,18	1,028	39,25	37,10	1,008	37,40	38,60	1,108	42,77

* H.G. = Humedad gravimétrica (promedio de tres repeticiones)

D.a. = Densidad aparente (promedio de tres repeticiones)

H.V. = Humedad volumétrica

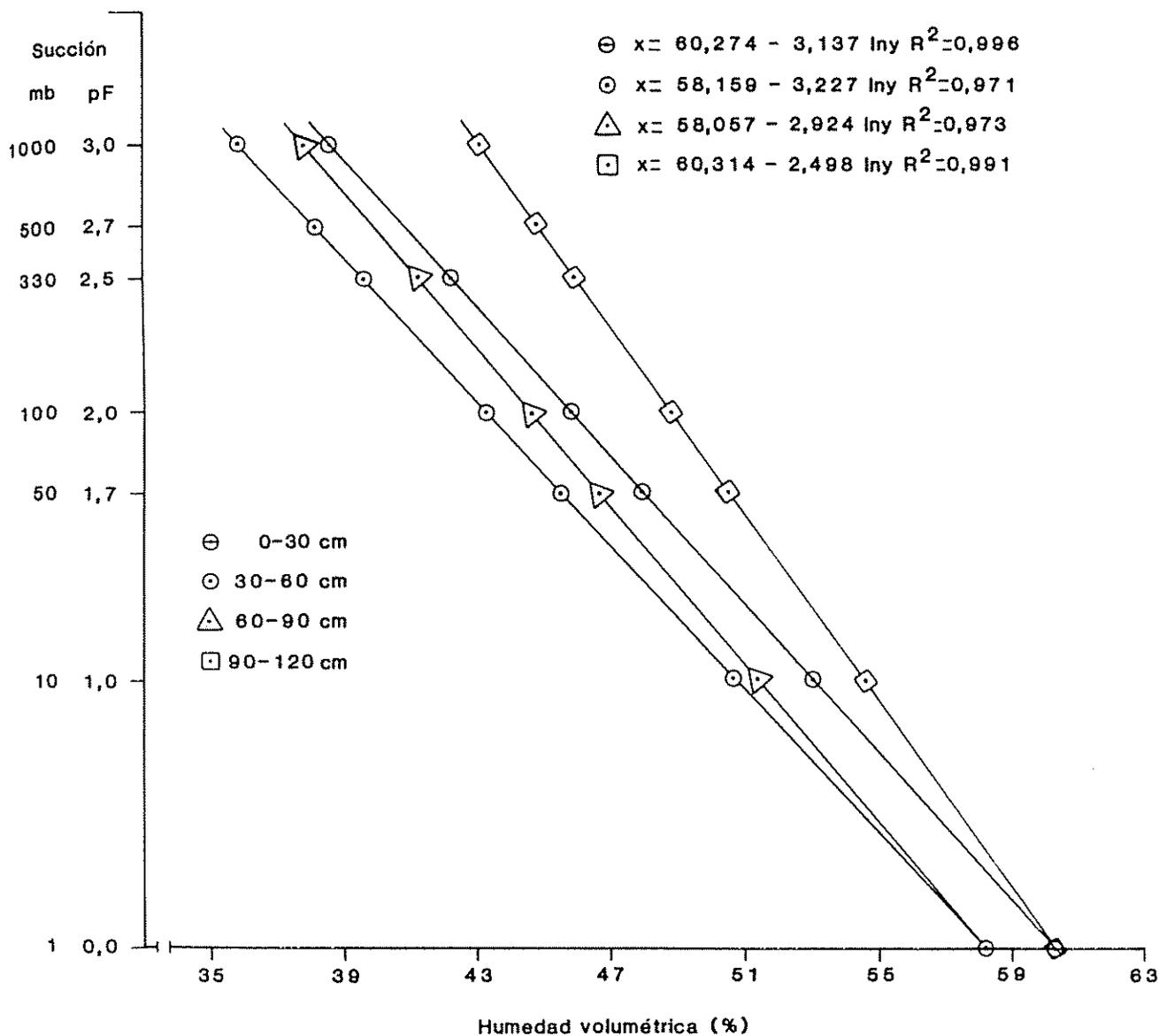


Fig. 7- Curvas de retención de humedad del suelo a diferentes profundidades.

así como de densidad aparente para el suelo estudiado son similares a los informados por otros investigadores (1, 5, 49) para esta área.

4.2 Variables climáticas

En el Cuadro 5A se incluyen los valores mensuales de diferentes variables climáticas medidas durante, los seis meses anteriores y el transcurso del ensayo en la estación agrometeorológica "La Montaña", situada a 200 m de la parcela experimental.

El total promedio de lluvia por década medido en los diferentes sitios de muestreo, tanto en el sistema agroforestal café-poró como en el café-laurel se incluyen en los Cuadros 6A y 7A, respectivamente.

En los Cuadros 3 y 4 se presentan los resultados de la cantidad de lluvia que ingresó al extremo superior del dosel, la cantidad interceptada por la vegetación y lo que llegó a la superficie del suelo en los dos sistemas agroforestales estudiados. Aunque, en determinados días la cantidad de agua medida fuera de la parcela fue menor que la medida dentro de ésta, en promedio durante todas las décadas en ambos sistemas agroforestales, la lluvia que llegó a la superficie del suelo fue menor a la que ingresó a la parte superior del dosel. En el sistema café-poró la lluvia interceptada fue de un 16,5 % de la que llegó a la parte superior del dosel, que se considera el 100 %. Este valor es bastante similar a los informados por Zambrana (75) en dos bosques tropicales de Turrialba, los cuales fueron de 15 y 16 %.

En el sistema café-laurel la intercepción fue de solamente un 7,6%. Esto se debe posiblemente a una menor densidad y cantidad de biomasa

Cuadro 3. Cantidad de agua de lluvia (mm) que ingresó al sistema agroforestal café-poró

Mes	Década	A la parte superior del dosel	A la superficie del suelo	Interceptada	Nº días con lluvia
JUL	1-10	36,8	27,7	9,1	5
JUL	11-20	35,6	31,5	4,1	6
JUL	21-31	46,8	42,2	4,6	8
AGO	1-10	86,1	79,1	7,0	9
AGO	11-20	26,4	24,5	1,9	5
AGO	21-31	151,6	129,8	21,8	8
SET	1-10	133,3	100,6	32,7	10
SET	11-20	22,4	10,9	11,5	5
SET	21-30	116,4	112,2	4,2	3
OCT	1-10	26,5	11,8	14,7	5
OCT	11-20	133,2	113,2	20,0	7
OCT	21-31	83,6	65,1	18,5	7
NOV	1-10	127,2	114,1	13,1	5
NOV	11-20	49,5	38,7	10,8	6
NOV	21-30	24,3	15,9	8,4	4
DIC	1-10	70,4	52,8	17,6	6
DIC	11-20	0,0	0,0	0,0	0
DIC	21-31	10,4	5,1	5,3	2
ENE	1-10	39,3	28,8	10,5	5
ENE	11-20	166,3	154,3	12,0	4
ENE	21-31	32,5	25,9	6,6	3
TOTAL	--	1418,6	1184,2	234,4	113
%	--	100	83,5	16,5	--

Cuadro 4. Cantidad de agua de lluvia (mm) que ingresó al sistema agroforestal café-laurel

Mes	Década	A la parte superior del dosel	A la superficie del suelo	Interceptada	Nº días con lluvia
AGO	1-10	87,9	81,1	6,8	9
AGO	11-20	27,7	25,0	2,7	5
AGO	21-31	151,9	143,1	8,8	8
SET	1-10	130,8	121,2	9,6	10
SET	11-20	18,8	15,5	3,3	5
SET	21-30	120,0	116,3	3,7	3
OCT	1-10	20,8	15,4	5,4	5
OCT	11-20	139,2	131,5	7,7	7
OCT	21-31	84,1	74,3	9,8	7
NOV	1-10	126,5	120,3	6,2	5
NOV	11-20	48,5	43,0	5,5	6
NOV	21-30	22,8	18,4	4,4	4
DIC	1-10	70,6	61,7	8,9	6
DIC	11-20	0,0	0,0	0,0	0
DIC	21-31	9,7	7,6	2,1	2
ENE	1-10	37,6	32,8	4,8	5
ENE	11-20	170,4	165,4	5,0	4
ENE	21-31	31,8	28,2	3,6	3
TOTAL	--	1299,1	1200,8	98,3	94
%	--	100	92,4	7,6	--

aérea en este sistema agroforestal, en relación al de café-poró, puesto que la densidad de siembra de los árboles de poró es mayor que la de árboles de laurel y además el café asociado con poró no ha sido sometido a podas tan profundas como el asociado con laurel. Lo comentado anteriormente se ve reforzado por el hecho de que la capacidad máxima promedio de retención de agua (mm interceptados/nº días con lluvia) del dosel es de 2,07 mm en el sistema café-poró y de 1,04 mm en el café-laurel. Referente a este aspecto, es importante hacer notar que en el sistema café-poró (Cuadro 3), durante los primeros meses posteriores a la poda de los árboles, la capacidad de intercepción del dosel es menor que en los meses subsiguientes cuando la biomasa aérea de los mismos ha aumentado considerablemente. En general, los valores de intercepción obtenidos en esta investigación están dentro de los límites informados en la literatura (41, 43, 75, 76), para diferentes coberturas vegetales.

El análisis de regresión determinó que en ambos sistemas agroforestales existe una relación lineal entre la cantidad decádica de agua que alcanzó la parte superior del dosel y la que llegó a la superficie del suelo. Para la asociación café-laurel la ecuación de mejor ajuste fue la siguiente:

$$y = -3,7844 + 0,9738 X, \text{ con un } R^2 = 0,998$$

mientras que para el sistema café-poró la expresión que relaciona las variables mencionadas es:

$$y = -5,5289 + 0,9134 X, \text{ con un } R^2 = 0,981,$$

en donde

X = la lluvia que ingresó a la parte superior del dosel y,

Y = la lluvia que llegó a la superficie del suelo luego de

atravesar el dosel. Las tendencias de esas relaciones se muestran en las Figuras 8 y 9.

Se probaron varios modelos para buscar una función que relacionara el agua interceptada, con la que ingresó a la parte superior del dosel, sin embargo, en todos los casos el coeficiente de ajuste (R^2) fue menor a 0,5. Estos resultados son bastante similares a los informados por Cáceres (12) para un bosque en Balalaica, Turrialba, Costa Rica. El encontró una alta correlación lineal ($r = 0,96$) entre la lluvia medida dentro y fuera del dosel y una baja asociación entre la lluvia interceptada y la medida fuera del dosel ($r = 0,6$). Esto se debe posiblemente, a que la cantidad de lluvia en diferentes eventos de precipitación es muy variable y la capacidad de intercepción del dosel de cada asociación es bastante constante.

4.3 Balance hídrico y percolación

4.3.1 Sistema agroforestal café-poró

En el Cuadro 5 se presenta la distribución decádica de los diferentes componentes del balance hídrico durante el período de estudio, en el sistema agroforestal café-poró. Durante julio y agosto no hubo percolación, a pesar de que en la primera y tercera década de agosto la lluvia que alcanzó la superficie del suelo fue bastante superior a la pérdida de agua por evapotranspiración. Esto se debe a que el contenido de agua en el suelo, al inicio de las observaciones fue bajo (580mm) por lo que el exceso de agua de este período fue utilizado para restituir la capacidad de almacenamiento máxima del suelo.

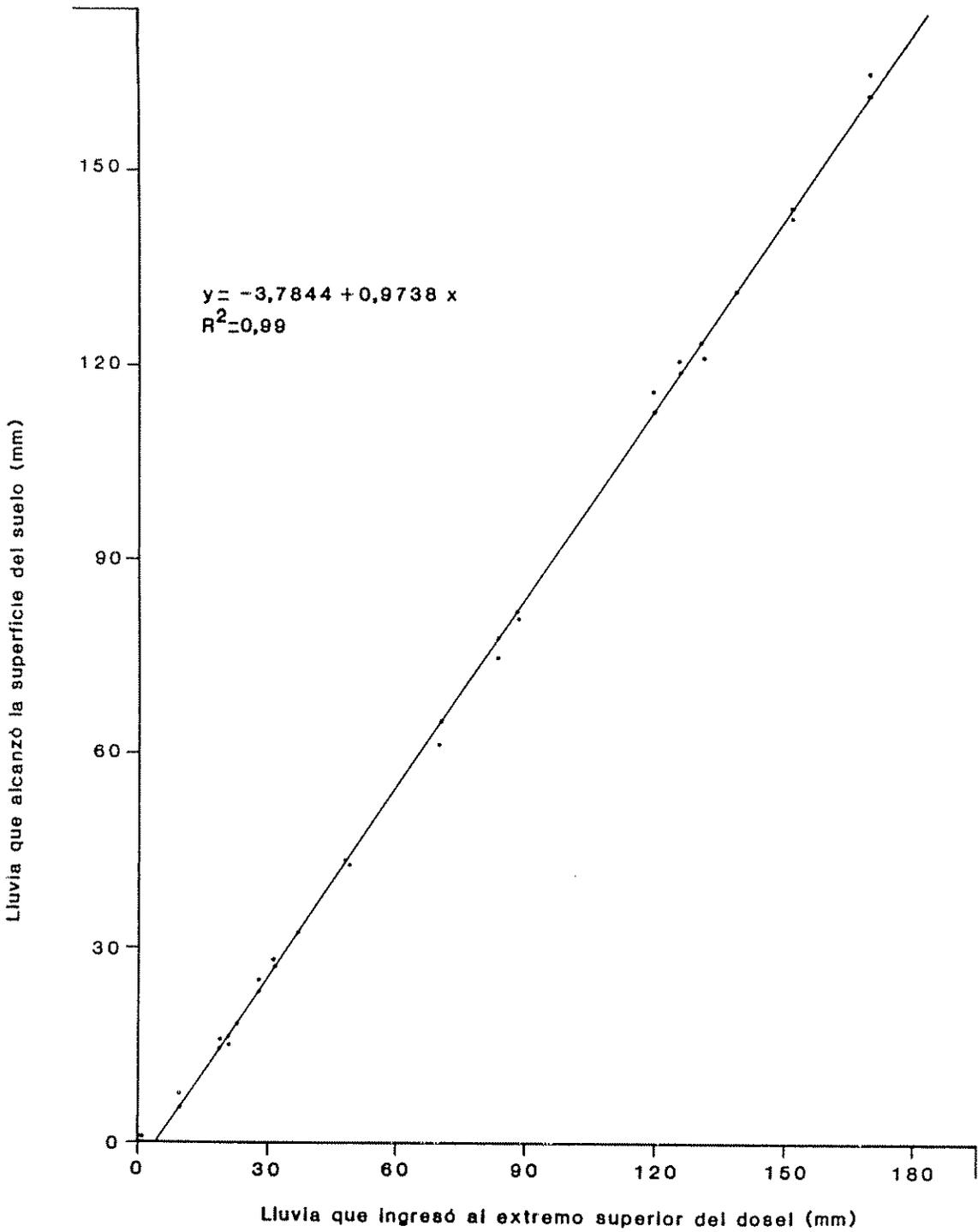


Fig. 8- Relación entre la cantidad de lluvia que ingresó al extremo superior del dosel del sistema agroforestal café - laurel, y la que alcanzó la superficie del suelo.

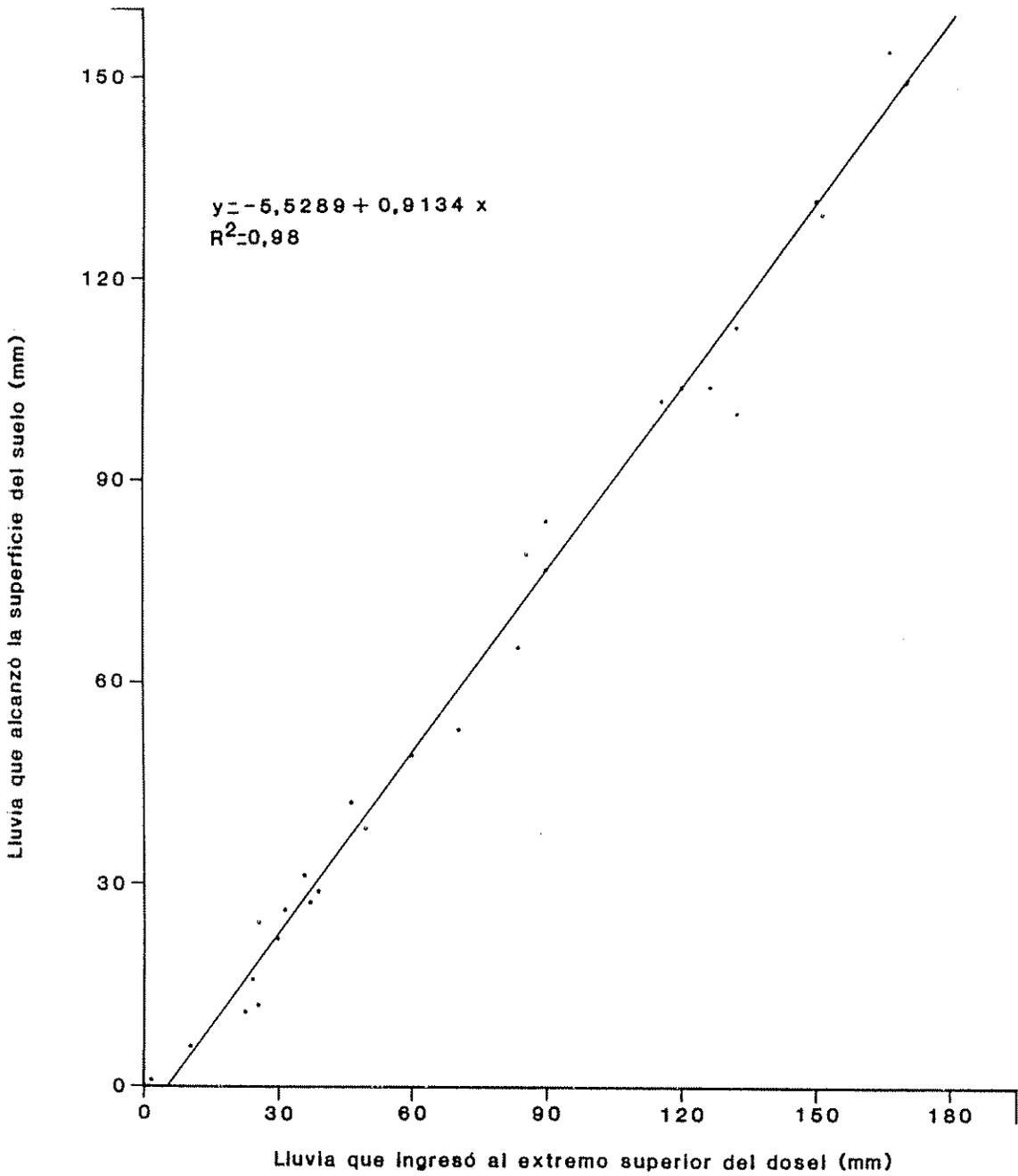


Fig. 9- Relación entre la cantidad de lluvia que ingresó al extremo superior del dosel del sistema agroforestal café-poró, y la que alcanzó la superficie del suelo.

Cuadro 5. Balance hídrico decádico en el sistema agroforestal café-poró*

Mes	Década	Lluvia (mm)	ETM (mm)	ΔH (mm)	CAS (mm)	P (mm)
JUL	1-10	27,7	35,4	-7,7	572,3	0,0
JUL	11-20	31,5	36,8	-5,3	567,0	0,0
JUL	21-31	42,2	42,2	0,0	567,0	0,0
AGO	1-10	79,1	28,0	+51,1	618,1	0,0
AGO	11-20	24,5	34,7	-10,2	607,9	0,0
AGO	21-31	129,8	44,6	+85,2	693,1	0,0
SET	1-10	100,6	27,4	+73,2	713,0	53,2
SET	11-20	10,9	43,7	-32,8	680,2	0,0
SET	21-30	112,2	47,6	+64,6	713,0	31,8
OCT	1-10	11,8	38,9	-27,1	685,9	0,0
OCT	11-20	113,2	33,0	+80,2	713,0	53,0
OCT	21-31	65,1	46,7	+18,4	713,0	18,4
NOV	1-10	114,1	27,3	+86,8	713,0	86,8
NOV	11-20	38,7	34,7	+4,0	713,0	4,0
NOV	21-30	15,9	35,5	-19,6	693,4	0,0
DIC	1-10	52,8	25,0	+27,8	713,0	8,2
DIC	11-20	0,0	36,7	-36,7	676,3	0,0
DIC	21-31	5,1	35,7	-30,6	645,7	0,0
ENE	1-10	28,8	28,2	+0,6	646,3	0,0
ENE	11-20	154,3	34,2	+120,1	713,0	53,4
ENE	21-31	25,9	34,2	-8,3	704,7	0,0
TOTAL		1184,2	750,5	--	--	308,8
%		100,0	63,3	--	--	26,0

* ETM = Evapotranspiración máxima

ΔH = Cambio de humedad en el suelo

CAS = Contenido de agua en el suelo; el inicial fue de 580 mm y la capacidad máxima de retención es de 713 mm a 1,2 m de profundidad.

P = Percolación

A partir de la primera década de setiembre, en todos los períodos con lluvia mayor a la evapotranspiración ocurrió percolación. Del 11 de octubre al 10 de noviembre fue la época en que hubo más percolación (158,2 mm), debido a que la cantidad de lluvia fue alta y la capacidad de almacenamiento del suelo estaba cerca del máximo (713 mm). La segunda década de enero fue la más lluviosa (154,3 mm), sin embargo, la percolación fue de sólo 53,4, ya que las tres décadas anteriores fueron muy secas, por lo tanto, el cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔH) fue negativo y se necesitó, al igual que en el inicio de las observaciones, gran parte del exceso de agua para restituir la capacidad de almacenamiento del suelo.

El total de agua percolada en los siete meses de estudio (julio de 1985 a enero de 1986) fue de 308,8 mm. Este valor representa un 26 % del total de lluvia que alcanzó la superficie del suelo y 21,8 % del total que llegó al extremo superior del dosel.

Debido a que en los meses previos al estudio (enero a junio) el total de lluvia fue bajo (Cuadro 5A) se puede afirmar que la cantidad de agua percolada durante el período que duró el estudio es válida para todo el año. Sin embargo, es importante hacer notar que la precipitación medida en 1985 fue 865 mm menor que el promedio de 43 años para la zona, (Cuadro 1A). Esto indica que si se mantuvieran los porcentajes obtenidos en el estudio, la percolación en un año con precipitación similar al promedio sería de unos 500 mm en el sistema agroforestal café-poró.

La evapotranspiración máxima, equiparable en este caso a la evapotranspiración real, osciló entre 25 y 48 mm por década durante

el período del estudio, lo que indica que es mucho menos variable que la precipitación. El total evapotranspirado durante el período de estudio fue de 750 mm. Esta cifra representa un 63,3 % de la lluvia que alcanzó la superficie del suelo y un 53 % del total que ingresó al extremo superior del dosel. En un año con lluvias similares al promedio estos porcentajes serían menores.

La ecuación del balance hídrico para el sistema agroforestal café-poró, durante el período de estudio se puede expresar de la siguiente manera:

$$P = \Delta H + ET + D$$

$$1184,2 = 124,9 + 750,5 + 308,8$$

Todos los datos están expresados en milímetros.

4.3.2 Sistema agroforestal café-laurel

En el Cuadro 6 se presenta la distribución decádica de los componentes del balance hídrico, durante el período de estudio (agosto de 1985 a enero de 1986), en el sistema agroforestal café-laurel.

El contenido de agua en el suelo a 1,2 m de profundidad al iniciarse las observaciones en esta asociación agroforestal fue de 576 mm. En la tercera década de agosto, no solamente se había restituido la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo, sino que hubo una pérdida de agua por percolación de 13,3 mm. En la primera década de setiembre fue cuando hubo más percolación (96 mm), sin embargo, en la época del 11 de octubre al 20 de noviembre ocurrió una gran parte (45,3 %) del total de agua percolada en el período. Entre el 11 de di-

Cuadro 6. Balance hídrico decádico en el sistema agroforestal café-laurel*

Mes	Década	Lluvia (mm)	ETM (mm)	ΔH (mm)	CAS (mm)	P (mm)
AGO	1-10	81,1	25,8	+55,3	631,3	0,0
AGO	11-20	25,0	32,0	-7,0	624,3	0,0
AGO	21-31	143,1	41,1	+102,0	713,0	13,3
SET	1-10	121,2	25,3	+95,9	713,0	95,9
SET	11-20	15,5	40,3	-24,8	688,2	0,0
SET	21-30	116,3	43,9	+72,4	713,0	47,6
OCT	1-10	15,4	35,9	-20,5	692,5	0,0
OCT	11-20	131,5	30,5	+101,0	713,0	80,5
OCT	21-31	74,3	43,1	+31,2	713,0	31,2
NOV	1-10	120,3	25,2	+95,1	713,0	95,1
NOV	11-20	43,0	32,0	+11,0	713,0	11,0
NOV	21-30	18,4	32,8	-14,4	698,6	0,0
DIC	1-10	61,7	23,0	+38,7	713,0	24,3
DIC	11-20	0,0	33,8	-33,8	679,0	0,0
DIC	21-31	7,6	33,0	-25,4	653,6	0,0
ENE	1-10	32,8	26,0	+6,8	660,4	0,0
ENE	11-20	165,4	31,6	+133,8	713,0	81,2
ENE	21-31	28,2	31,6	-3,4	709,6	0,0
TOTAL		1200,8	586,9	---	---	480,1
%		100,0	48,8	---	---	40,0

* ETM = Evapotranspiración máxima

ΔH = Cambio de humedad en el suelo

CAS = Contenido de agua en el suelo; el inicial fue de 576 mm y la capacidad máxima de retención es de 713 mm a 1,2 m de profundidad.

P = Percolación

ciembre y el 10 de enero se presentó una disminución considerable en la cantidad de lluvias. El contenido de agua en el suelo a la profundidad estudiada bajó hasta 654 mm en relación a 713 mm que es la capacidad máxima de almacenamiento de agua del perfil.

El total de agua percolada en el periodo estudiado fue de 480,1 mm. Este valor representa un 40,0 % del total de agua que alcanzó la superficie del suelo y un 37 % del que ingresó a la parte superior del dosel. Si se mantuviera ese porcentaje, en un año con precipitación similar al promedio, la pérdida de agua por percolación en este sistema agroforestal serían de 1064 mm.

La evapotranspiración máxima, comparable en este caso a la real fue de 586,9 mm, valor que representa un 48,8 % del total del agua de lluvia que llegó a la superficie del suelo y un 45,2 % de la que ingresó a la parte superior del dosel. La diferencia entre las décadas de mayor y menor evapotranspiración fue de solamente 19 mm.

De acuerdo a la magnitud de los diferentes componentes del balance hídrico, la ecuación que representa el mismo, podría ser escrito para el período de estudio en la asociación agroforestal café-laurel de la siguiente manera:

$$P = \Delta H + ET + D$$

$$1200,8 = 133,6 + 586,9 + 480,1$$

Todos los valores están en milímetros.

Al establecer una comparación entre los dos sistemas agroforestales con respecto a los componentes del balance hídrico, se obtiene que la lluvia que llegó a la superficie del suelo fue mayor en la asociación café-laurel: 92,5 % de la que ingresó a la parte superior del do-

sel, en relación a un 83,5 % en café-poró. Esto se debe a que la biomasa aérea en el café-poró es más densa ya que los árboles de poró están plantados a una menor distancia. Además, en este sistema las plantas de café se han sometido a podas menos profundas que en el café-laurel. Esa cobertura vegetal más exuberante en el sistema café-poró causó que su capacidad de intercepción fuera mayor (Cuadros 3 y 4), por lo tanto la cantidad de agua que llegó al suelo también fue menor, la evapotranspiración mayor y la pérdida de agua del suelo mediante la percolación también disminuyó.

En ambos agroecosistemas se obtuvo un buen ajuste al modelo de regresión exponencial (Figura 10), de la cantidad decádica de agua de lluvia que llegó al suelo y la que percoló, luego que el suelo alcanzó su capacidad máxima de retención de agua. Esto ocurrió a partir de la primera década de setiembre. Se nota en la Figura 10 que existe mayor percolación en el sistema agroforestal café-laurel, en relación al café-poró, principalmente cuando la cantidad de lluvia que llegó al suelo fue mayor de 80 mm.

La magnitud de la percolación en ambos sistemas agroforestales, hace suponer que en la época más lluviosa, gran parte de los nutrientes más fácilmente lixiviables, egresan del agroecosistema. Esto es más crítico en la asociación café-laurel.

No existe en la literatura información sobre la distribución y magnitud de los componentes del balance hídrico en sistemas agroforestales similares a los estudiados. En la India, Singh y Russell (65), usando una metodología similar en un Alfisol sembrado de sorgo, informan que las pérdidas por evapotranspiración y drenaje fueron de 56 % y 29 %

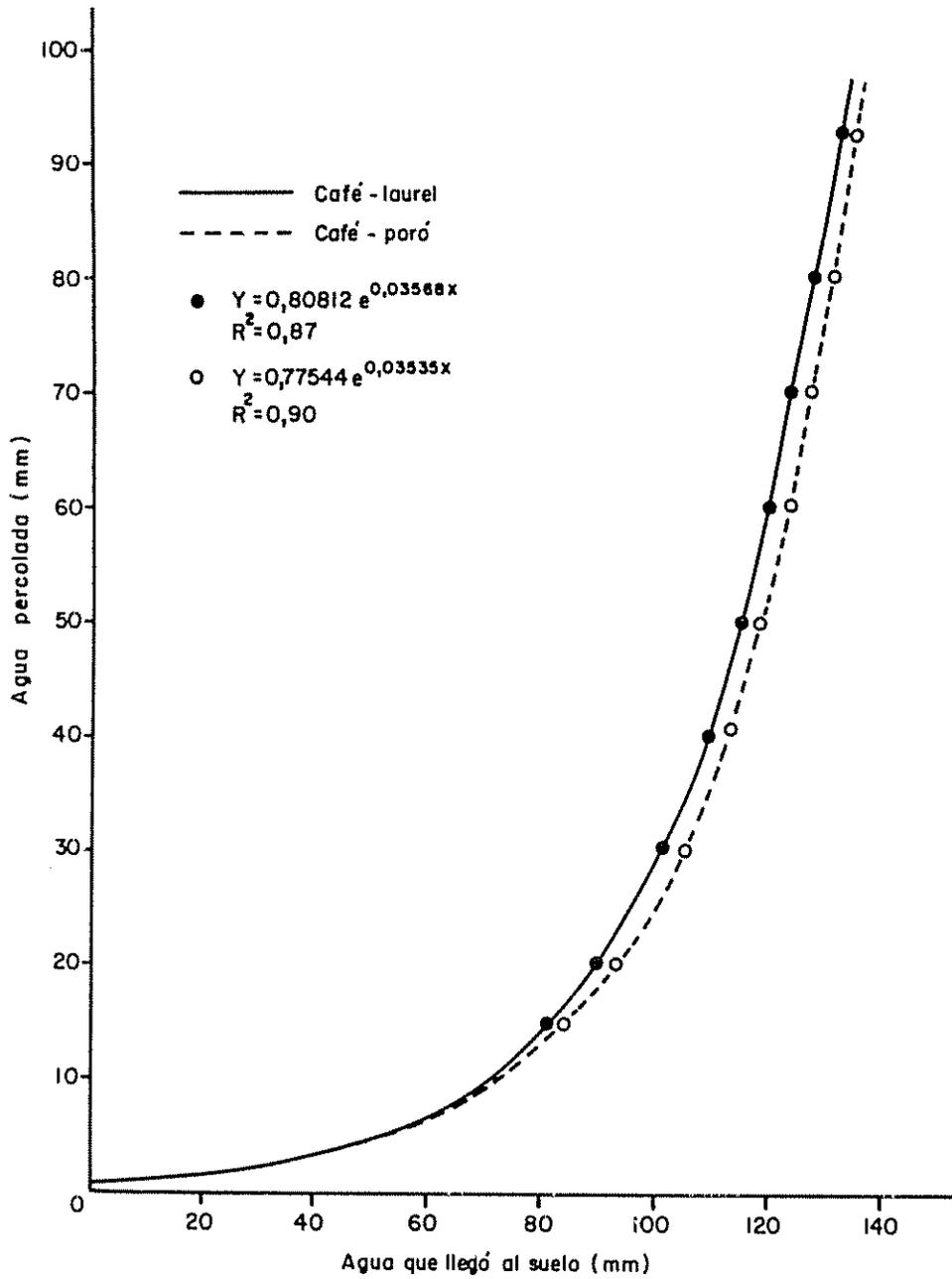


Fig. 10 Relación entre la cantidad decádica de lluvia que llegó al suelo y la percolada, después que el suelo alcanzó su capacidad máxima de retención de agua

del total de lluvia del período. Grimm y Fassbender (26) en un estudio sobre el ciclo hidrológico en un ecosistema forestal en Venezuela, informan que la evapotranspiración alcanzó un 62 % y la percolación un 37 % del total de lluvia del período que fue de 1576 mm.

En Costa de Marfil la pérdida de agua por percolación en un Ultisol con cobertura de caucho fue de 54 % de la pluviosidad anual, mientras que en el mismo país en un Ultisol sembrado de banano fue de 41 %. En Colombia en un Andept con cobertura de pastos, alcanzó un 57 % y en el mismo suelo pero descubierto fue del 70 % (63).

De lo anterior se deduce que es difícil la comparación de resultados de balance hídrico ya que estos varían principalmente con el tipo de suelo, la cobertura, el manejo del medio, el clima y la época en que se realicen los estudios.

4.4 Humedad del suelo

4.4.1 Sistema agroforestal café-poró

En el Cuadro 7 se presentan los datos de humedad del suelo en el sistema agroforestal café-poró, expresados como promedios decádicos a los diferentes intervalos de profundidad. Se nota que existe una disminución leve en la humedad hasta una profundidad de aproximadamente 90 cm. A partir de ahí, hay un incremento fuerte en el intervalo de 90 a 120 cm. Este comportamiento se mantuvo durante todo el período de estudio.

Los períodos con más alta humedad en el suelo se tuvieron

Cuadro 7. Variación decádica de la humedad volumétrica del suelo (%), en el sistema agroforestal café-poró

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)			
		0-30	30-60	60-90	90-120
JUL	1-10	45,06	55,23	43,77	50,08
JUL	11-20	45,75	44,52	44,11	50,31
JUL	21-31	45,43	44,30	43,66	49,87
AGO	1-10	46,91	45,32	44,85	50,54
AGO	11-20	45,43	44,55	44,42	50,31
AGO	21-31	46,50	45,33	44,79	50,75
SET	1-10	46,80	45,38	44,86	50,98
SET	11-20	44,94	44,52	44,16	50,41
SET	21-30	45,57	44,53	44,27	50,61
OCT	1-10	43,18	43,00	42,66	48,76
OCT	11-20	43,94	43,74	43,35	49,67
OCT	21-31	46,38	45,04	44,32	50,38
NOV	1-10	47,02	45,53	45,00	50,96
NOV	11-20	46,05	44,65	44,01	49,93
NOV	21-30	45,37	44,14	43,57	49,65
DIC	1-10	46,35	44,54	43,43	49,41
DIC	11-20	44,82	44,22	43,78	49,87
DIC	21-31	42,09	42,15	41,69	48,59
ENE	1-10	44,48	43,00	41,52	47,88
ENE	11-20	46,44	44,89	44,00	49,59
ENE	21-31	45,17	44,25	43,64	49,91

en la primera y tercera década de agosto, primera década de setiembre y primera década de noviembre; mientras que las dos primeras décadas de octubre, la tercera de diciembre y la primera de enero fueron en las que la humedad fue menor (Figura 11). En esta misma figura se puede observar que las variaciones de humedad estuvieron estrechamente relacionadas con la distribución de las lluvias a través del período de estudio.

En el intervalo de profundidad entre 90 y 120 cm fue donde la humedad permaneció más constante. Esto se debe, posiblemente, a una baja concentración de raíces a esa profundidad y al ascenso capilar de agua desde la capa freática del suelo. La humedad a esta profundidad fue, además, la más alta, lo que confirma los datos encontrados en la curva pF. Estos indican una mayor densidad aparente y capacidad de retención de agua de la capa de suelo situada entre 90 y 120 cm de profundidad.

Considerando que los intervalos de 0 a 30, 30 a 60 y 60 a 90 cm de profundidad tienen una capacidad de retención de agua muy similar; se puede atribuir a una mayor concentración de raíces extractoras de agua, la variación observada en las curvas de humedad a esas profundidades (Figura 11). Esta suposición se ve reforzada porque en general, en todos los estratos se mantuvo esa tendencia (Cuadros 8A, 9A, 10A, 11A y Figuras 1A, 2A, 3A y 4A). De acuerdo a lo anterior, se puede indicar que para el sistema agroforestal café-poró estudiado, la capa de suelo hasta un metro de profundidad es, posiblemente, la más dinámica, tanto física como biológicamente, por lo tanto, de donde las plantas de café y los árboles de poró absorben la mayor parte del agua necesaria

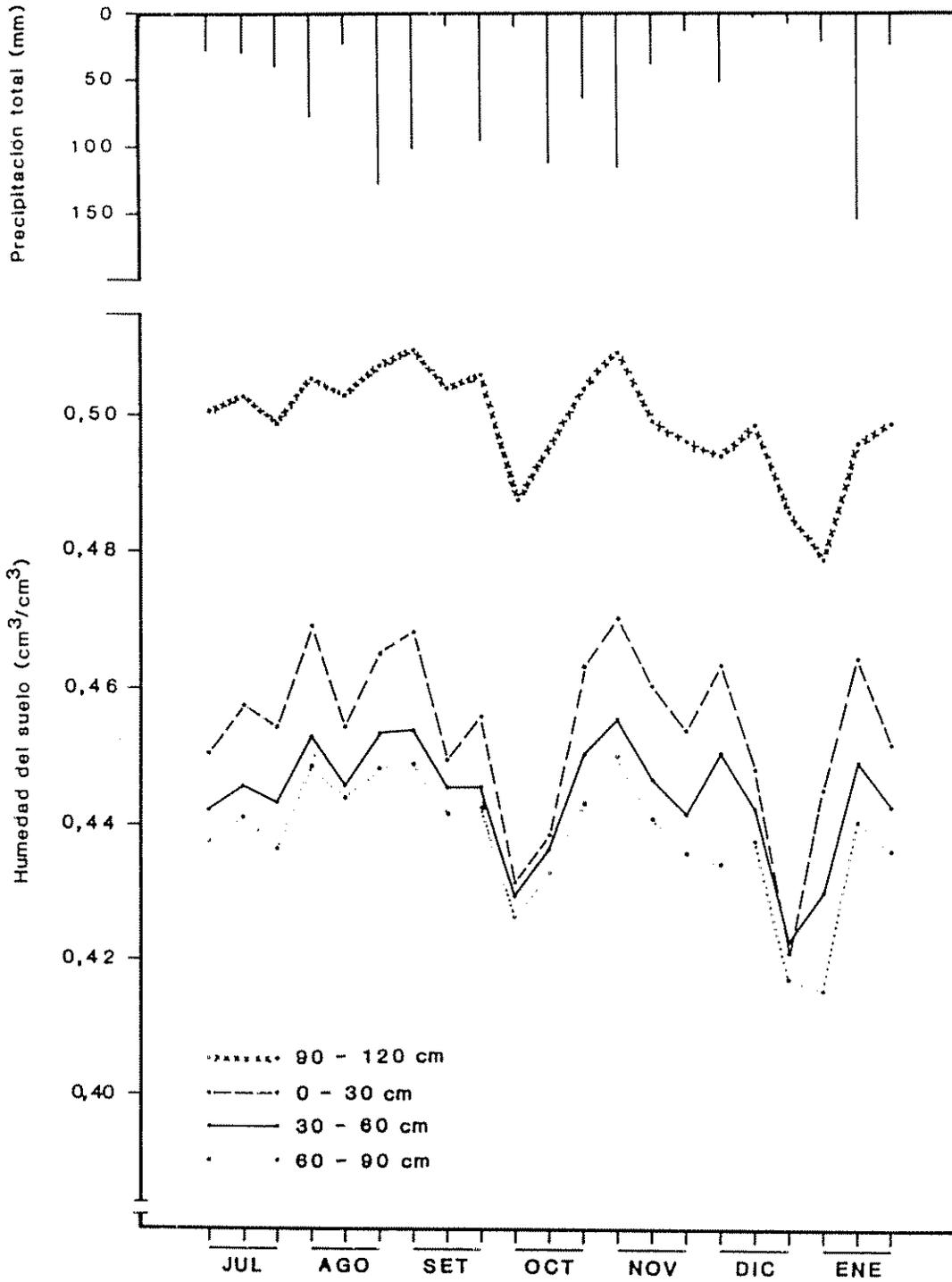


Fig. 11- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró.

para su crecimiento y desarrollo.

Es importante destacar que los datos de humedad que se presentan en este estudio, al igual que los que se presentan en otros estudios, representan la tendencia promedio de la humedad del suelo y de las reservas de agua en la zona radical, para las condiciones especificadas, debido a que la humedad del suelo es altamente dinámica en el tiempo y el espacio (29, 73).

En los Cuadros 8A, 9A, 10A y 11A se presentan los datos de los promedios decádicos de tensión y los valores correspondientes de humedad volumétrica medidos en los diferentes estratos y profundidades del sistema agroforestal café-poró. Una representación gráfica de la variación de la humedad y la lluvia a través del período de estudio, en los diferentes estratos, se puede observar en las Figuras 1A, 2A, 3A y 4A. En general, las curvas de humedad del suelo en los diferentes estratos son muy similares en el intervalo de 90 a 120 cm de profundidad. De 0 a 90 cm son bastante similares para los estratos bajo el árbol de poró y entre el árbol de poró y el café (Figuras 1A y 2A). Entre hileras de café (Figura 4A), existe más separación entre las curvas de 0 a 30, 30 a 60 y 60 a 90 cm, mientras que en el estrato bajo café (Figura 3A) la separación entre las curvas es menor, sobre todo en los períodos menos húmedos. Es importante anotar que a pesar de estas diferencias, la tendencia general de las curvas de humedad del suelo son similares en todos los estratos, lo que posiblemente se deba a dos razones principales: aún cuando hubo períodos menos húmedos, en general, la tensión del agua en el suelo fue muy baja durante todo el período y la segunda posibilidad es que las características del suelo permiten un adecuado

avance lateral del frente de humedad, con lo que se obtiene una condición bastante uniforme de humedad en todo el suelo.

4.4.2 Sistema agroforestal café-laurel

En el Cuadro 8 se presentan los datos correspondientes a la humedad del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, expresados como promedios decádicos a los diferentes intervalos de profundidad.

Al igual que en el sistema agroforestal café-poró, la humedad en el intervalo de profundidad de 90 a 120 cm fue bastante constante y elevada durante todo el período de estudio. Esto indica que es la capa del suelo en la cual la humedad es menos dinámica y supone además, una baja densidad radical del café y el laurel. En la profundidad de 0 a 30 cm la humedad fue más alta que en los intervalos de 30 a 60 y 60 a 90 cm. En estos últimos dos intervalos de profundidad fue prácticamente similar la mayor parte del período, debido posiblemente a una distribución radical similar en ambas capas del perfil del suelo. Es importante hacer notar que aunque hubo una humedad más alta en los primeros 30 cm, no indica que haya menos raíces absorbentes (varios autores: 22, 27, 50 señalan que el café concentra su sistema radical en los primeros 50 cm del suelo), sino que posiblemente la capacidad y la necesidad de absorción de agua del café no es tan intensa como la del árbol de laurel.

En la Figura 12 se observa la distribución decádica de la humedad del suelo y la lluvia en la asociación café-laurel. Los períodos de más alta humedad correspondieron a aquellos en los cuales la llu-

Cuadro 8. Valores decádicos promedios de la humedad volumétrica del suelo (%) en el sistema agroforestal café-laurel

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)			
		0-30	30-60	60-90	90-120
AGO	1-10	46,90	45,14	43,59	51,08
AGO	11-20	44,17	44,01	43,69	51,35
AGO	21-31	45,87	44,92	44,40	52,01
SET	1-10	46,02	45,00	44,42	51,87
SET	11-20	43,89	43,77	43,27	51,20
SET	21-30	43,48	43,68	43,56	51,32
OCT	1-10	41,49	40,46	41,41	49,72
OCT	11-20	41,73	40,82	42,03	50,03
OCT	21-31	46,11	45,15	44,54	51,03
NOV	1-10	47,18	45,93	45,59	51,81
NOV	11-20	46,48	45,33	44,80	51,26
NOV	21-30	44,18	43,20	42,53	50,38
DIC	1-10	45,32	42,38	42,56	49,92
DIC	11-20	43,64	43,61	44,11	50,82
DIC*	21-31	39,40	39,54	40,68	49,33
ENE	1-10	42,12	39,71	40,08	48,80
ENE	11-20	45,23	41,69	41,98	50,30
ENE	21-31	43,50	43,22	43,03	50,47

* Los datos de 0-90 cm de profundidad fueron estimados.

via fue también más alta: en las últimas dos décadas de agosto y primeras dos de noviembre. La primera década de octubre, la última de diciembre y la primera de enero fueron las menos húmedas.

En los Cuadros 12A, 13A, 14A y 15A presentan los datos de los promedios decádicos de tensión y de la humedad volumétrica correspondiente, medidas en los diferentes estratos y profundidades del sistema agroforestal café-laurel. Una representación gráfica de variación temporal de la humedad del suelo y la lluvia en los diferentes estratos se puede observar en las Figuras 5A, 6A, 7A y 8A. En general, la curva de humedad del intervalo de profundidad entre 90 y 120 cm de profundidad fue muy similar en todos los estratos.

En los estratos bajo el árbol de laurel y bajo el árbol de laurel y el café (Figuras 5A y 6A) las variaciones de humedad a través del período de estudio fueron más amplios que en los estratos bajo el café y entre hileras de café (Figuras 7A y 8A). Este comportamiento fue más relevante en la profundidad de 30 a 90 cm. Todo esto hace suponer que los árboles de laurel extraen grandes cantidades de agua del suelo; inclusive en la primera década de diciembre fue necesario estimar los datos de tensión en esos estratos, ya que esta fue superior a la que pueden medir los tensiómetros.

En ninguno de los estratos hubo una diferenciación clara de las curvas de humedad para los intervalos de profundidad de 30 a 60 y 60 a 90 cm, lo que refuerza la suposición de que existe distribución bastante uniforme de raíces en esa zona del suelo, considerando además, que su capacidad de retención de agua es muy similar.

En general la humedad del suelo fue menor en el sistema

agroforestal café-laurel que en el sistema café-poró. Esto se puede explicar en razón de que ocurrió mayor percolación en la asociación café-laurel y que la evaporación desde el suelo fue también mayor en la de café-laurel. Bronstein (10) trabajando en el mismo experimento central encontró que tanto en la época más húmeda como en la más seca, la humedad del suelo en los primeros 15 cm, era más alta en las parcelas con poró que en las parcelas con laurel. Langdon y Trousdell (39) señalan que el rendimiento del agua y la humedad del suelo son afectadas por la cantidad de vegetación presente.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede afirmar que en ambos sistemas agroforestales el contenido de humedad varió dentro de la parte más baja del ámbito de humedad productiva (humedad mayor al punto de marchitez permanente). Esto hace suponer que este factor no fue limitante durante el período de estudio, pues varios autores (11, 28, 29, 64) indican que el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos agrícolas y de los bosques es máximo cuando la humedad del suelo es abundante o cercana a la capacidad de campo.

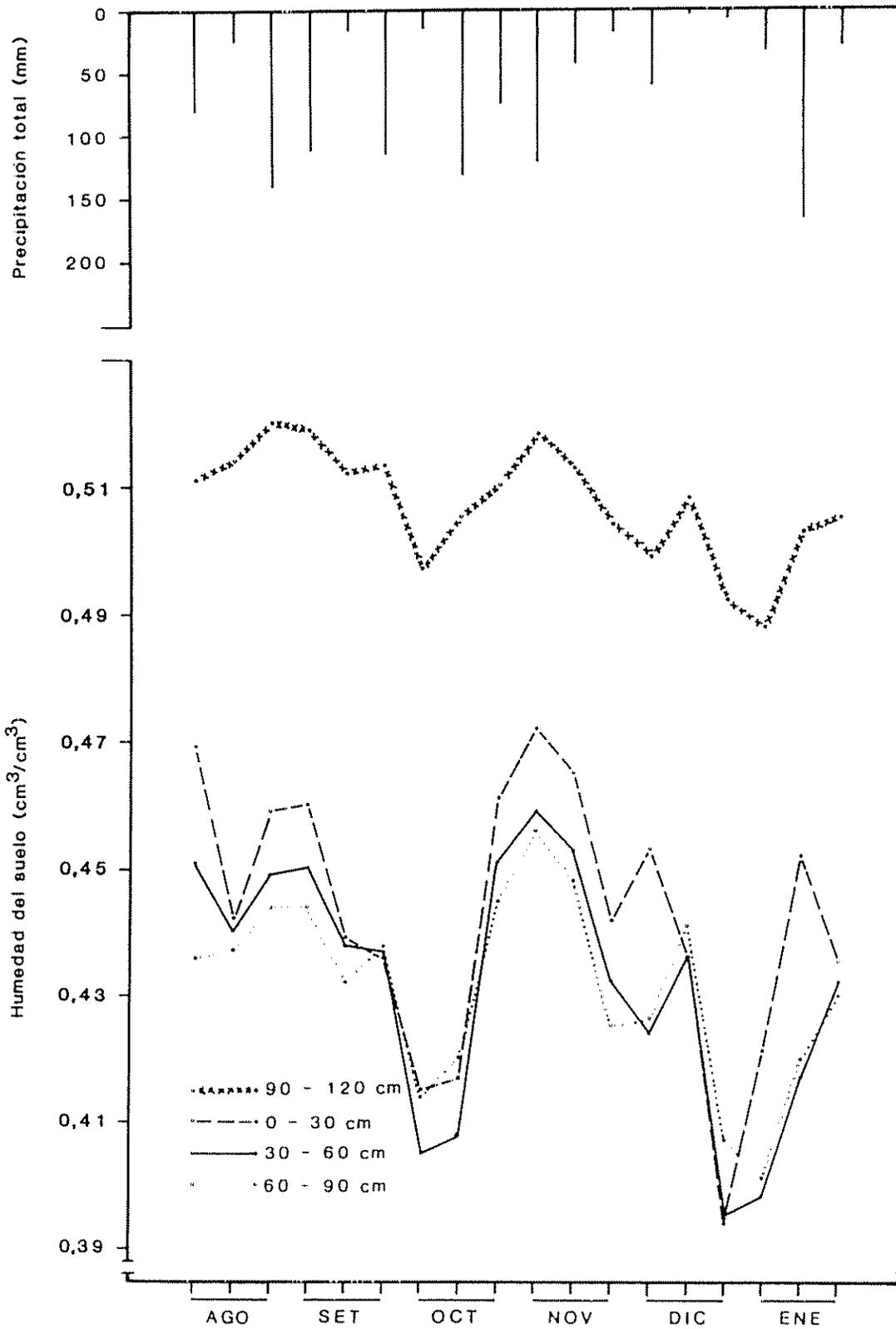


Fig. 12- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel.

5. CONCLUSIONES

1. La capacidad de retención de agua del suelo es bastante homogénea hasta 90 cm de profundidad, a las diferentes succiones. Después de esa profundidad aumenta, debido principalmente a una mayor densidad aparente del suelo.
2. Existe un alto grado de asociación (>98 %) entre la cantidad de agua que llegó al extremo superior del dosel en ambos sistemas agroforestales y la que alcanzó la superficie del suelo.
3. El grado de asociación entre la cantidad de lluvia interceptada por el dosel de los sistemas agroforestales estudiados, y la que ingresó a la parte superior del mismo y al suelo es muy bajo. Esto se debe a que la cantidad de lluvia en diferentes eventos de precipitación es muy variable y la capacidad de intercepción del dosel de cada asociación es bastante constante.
4. El sistema agroforestal café-poró tiene más capacidad de intercepción de agua, debido a su mayor cantidad y densidad de biomasa aérea.
5. La pérdida de agua de mayor magnitud la constituyó la evapotranspiración, con un 53 % y 45,2 % del total que llegó a la parte superior del dosel, para la asociación café-poró y café-laurel, respectivamente.

6. La percolación fue mayor en el sistema agroforestal café-laurel, debido a su menor capacidad de intercepción; lo que permite que más cantidad de agua llegue hasta la superficie del suelo y pueda egresar del ecosistema, cuando la cantidad que ingresa, excede la capacidad de retención del perfil del suelo.
7. Las variaciones de la humedad del suelo en ambos sistemas estuvieron estrechamente relacionadas con la cantidad y distribución de las lluvias a través del período de estudio.
8. Las mayores variaciones de humedad ocurrieron en los primeros 100 cm de profundidad del suelo, lo que indica que allí se encuentra concentrada la mayor parte del sistema radical de las especies estudiadas.
9. Las diferencias en la capacidad de lluvia que ingresó a los diferentes estratos fueron mayores que las mostradas en humedad del suelo, lo que indica que el agua al ingresar al suelo tiende a distribuirse uniformemente, en respuesta a las gradientes hidráulicas existentes entre los estratos.

6. LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE, A.V. 1971. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e Investigaciones, IICA-Turrialba, Costa Rica Tesis Mg. Sc., Turrialba, C.R., IICA/CTEI. 145 p.
2. ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. 1983. Estudio de sistemas agroforestales en el "Experimento Central" del CATIE, Turrialba. I. Determinación de biomasa y acumulación de reservas nutritivas (N, P, K, Ca, Mg). Turrialba, C.R., CATIE. 28 p.
3. BAUGARTNER, A. 1967. Energetic bases for differential vaporization from forest and agricultural lands. In Sopper, W.E. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Oxford, England, Pergamon Press. p. 381-389.
4. _____. 1970. Vaporization in forests. In Joint FAO/U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 70-90.
5. BERISH, C.W. 1983. Roots, soil litter, and nutrient changes in simple and diverse tropical successional ecosystems. Ph.D. Thesis. Turrialba, C.R. University of Florida. 298 p.
6. BLACK, T.A.; GARDNER, W.R.; THURTELL, G.W. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. Soil Science American Proceedings (EE.UU.) 33(5):655-660.
7. _____.; _____.; TANNER, C.V. 1970. Water storage and drainage under a row crop on a sandy soil. Agronomy Journal (EE.UU.) 62(1):48-51.
8. BLAIR, T.A. 1946. Weather elements. New York, Prentice-Hall. 401 p.
9. BOCHKOV, A.P. 1970. Influence of forests and agrosilvicultural-ameliorative activities on the water level of streams and streamlets. In Joint FAO/U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 93-100.
10. BRONSTEIN, G.E. 1984. Producción comparada de una pastura de Cynodon plectostachyus asociada con árboles de Cordia alliodora, con árboles de Erythrina poeppigiana y sin árboles. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 110 p.

11. BROWN, C. 1978. The physiological role of water in tree growth and development. In Balmer, W., ed. Soil moisture ... site productivity symposium. Proceedings. Myrtle Beach, EE.UU., U.S. Department of Agriculture. p. 22-29.
12. CACERES, G. 1981. Importancia hidrológica de la intercepción horizontal en un bosque muy húmedo premontano en Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc., Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 98 p.
13. COOPER, P.J.; KEATINGE, J.D.; HUGHES, G. 1983. Crop evapotranspiration - A technique for calculation of its components by field measurements. Field Crop Research (EE.UU.) 7(4):299-312.
14. CORBETT, E.S. 1967. Measurement and estimation of precipitation on experimental watersheds. In Sopper, W.E. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Oxford, England, Pergamon Press. p. 107-129.
15. DABRAL, B.G.; SUBBA, B.K. 1968. Interception studies in chir and teak plantations at new-forest. Indian Forester (India) 94(7):541-551.
16. DELFS, J. 1967. Interception and stemflow in stands of norway spruce and beech in West Germany. In Sopper, W.E. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Oxford, England, Pergamon Press. p. 179-185.
17. DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. 1979. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, FAO: estudio riego y drenaje no. 33. p. 18-40.
18. _____.; PRUITT, W.O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma, FAO: estudio riego y drenaje no. 24. 194 p.
19. ENRIQUEZ, G. 1979. Ensayo central de cultivos perennes en comparación con algunos anuales. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina, Turrialba, Costa Rica, 1979. Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R. CATIE. p. 199-202.
20. FASSBENDER, H.W. 1984. Bases edafológicas de los sistemas de producción agroforestales. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 191 p.
21. FORSYTHE, W. 1980. Física de suelos; manual de laboratorio. San José, IICA. 212 p.
22. FRANCO, C.M.; INFORZATO, R. 1946. Sistema radicular de cafeeiro nos principais tipos de solo do Estado de Sao Paulo. Bragantia (Bra.) 6(9):443-478.
23. FRERE, M.; REA, J.; RIJKS, J. 1975. Estudio agroclimatológico de la zona andina. Roma, FAO/UNESCO/OMM. 375 p.

24. GARCIA, J. 1971. La evapotranspiración y métodos para su cálculo. Balance hidrológico. In Seminario para profesores de ecología de facultades de agronomías de Centro América, México y el Caribe. Documentos. San José, C.R. IICA. 11 p.
25. GAVANDE, S. 1976. Física de suelos: principios y aplicaciones. México, Limusa. p. 157-232.
26. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos en el agua. Turrialba (C.R.) 31(2):89-99.
27. GUISCAFRE-ARRILLAGA, J. 1938. Studies of the root system of Coffea arabica. Journal of agriculture (P.R.) 22(2):227-262.
28. HAINES, L.W.; HAINES, S.G. 1978. Site preparation for regeneration. In Balmer, W., ed. Soil moisture ... site productivity symposium. Proceedings. Myrtle Beach, EE.UU., U.S. Department of Agriculture. p. 177-178.
29. HANSEN, E.A. 1978. Forest irrigation: a review. In Balmer, W., ed. Soil moisture ... site productivity symposium. Proceedings. Myrtle Beach, EE.UU., U.S. Department of Agriculture. p. 127-137.
30. HELVEY, J.D.; PATRIC, J.M. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. Water Resources Research (EE.UU.) 1(1):193-206.
31. HEUVELDOP, J. 1986. Agroclimatología Tropical. San José, C.R., UNED. s.p. (en prensa).
32. HILLEL, O. 1982. Introduction to soil physics. New York, Academic Press. 365 p.
33. HOLDRIDGE, L.R. 1982. Ecología basada en zonas de vida. Trad. del inglés por Humberto Jiménez. San José, C.R., IICA. 216 p.
34. HOUNAM, E.E. 1971. Problems of evaporation assessment in the water balance. Geneva, Switerland, WMO. Report no. 13. 81 p.
35. JIMENEZ, F. 1985. Evapotranspiración: conceptos y métodos empíricos para su estimación. Turrialba, C.R., CATIE. 16 p. (mimeogr.).
36. _____. 1986. Resumen acumulado de datos agroclimáticos. Turrialba, C.R., CATIE. 2 p.
37. KASMAN, R.G. 1974. Hidrología moderna. México. Continental. p. 22-25.

38. KISH, L. 1972. Survey sampling. New York, Wiley. 739 p.
39. LANGDON, O.G.; TROUSDELL, K.B. 1978. Stand manipulation: effects on soil moisture and tree growth in southern pine and pine-hardwood stands. In Balmer, W., ed. Soil moisture ... site productivity symposium. Proceedings. Myrthe Beach, EE.UU., U.S. Department of Agriculture. p. 231-235.
40. LEONARD, R.E. 1967. Mathematical theory of interception. In Sopper, N.W. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Oxford, England, Pergamon Press. p. 131-136.
41. LEYTON, L.; REYNOLDS, E.R.; THOMPSON, B.F. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In Sopper, W.E. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Oxford, England, Pergamon Press. p. 163-178.
42. _____.; RODDA, J.C. 1970. Precipitation and forest. In Joint FAO/U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 16-27.
43. _____. 1981. Crop water use: principles and some considerations for agroforestry. In Huxley, P.A., ed. Plant research and agroforestry. Proceedings of a consultative meeting. Nairobi, Kenya, ICRAF, p. 377-399.
44. LIEBSCHER, H.J. 1985. The hydrological cycle and the influence exerted upon it by man. Applied Geography and Development (Alemania) 26:32-45.
45. MANOKARAN, N. 1979. Stemflow, throughfall and rainfall interception in a lowland tropical rain forest in Peninsular Malaysia. The Malaysian Forester (Malasia) 42(3):171-201.
46. MCGOWAN, M.; WILLIAMS, J.B. 1980. The water balance of an agricultural catchment. III. The water balance. Journal of Soil Science (EE.UU.). 31(2):263-277.
47. MOJICA, I.H. 1970. Interception and stemflow studies in a tropical rain forest: La Selva, Costa Rica. Washington, OTS and Washington University. 15 p.
48. MOLCHANOV, A.A. 1970. Precipitation cycles in various natural zones and in individual forest types. In Joint FAO/U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 28-40.
49. MOLERO, A. 1972. La dinámica del agua y del espacio aéreo en las capas superficiales de los suelos de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., IICA/CTEI. 185 p.

50. NORMAN, M.J. 1979. Annual cropping systems in the tropics. Gainesville, University Press of Florida. 275 p.
51. NUTMAN, F.J. 1933. The root system of C. arabica. I. Root systems in typical soil of British East Africa. *Empire Journal Experimental Agriculture (G.B.)* 1(3):271-284.
52. PRICE, N. 1982. A comparison of water balance components in natural and plantation forest in El Salvador, Central America. *Turrialba (C.R.)* 32(4):399-416.
53. REDDY, S.J. 1983. A simple method of estimating the soil water balance. *Agricultural Meteorology (Holanda)* 28(1):1-17.
54. REY, A.R.; HOZ, L.Q. DE LA. 1979. Manual de riego de los principales cultivos de Cuba. La Habana, Cuba, Orbe. p. 29-74.
55. RICHARDS, L.A. 1940. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science (EE.UU.)* 68(1):91-112.
56. _____. 1941. Uptake and retention of water by soil as determined by distance to a water table. *Agronomy Journal (EE.UU.)* 33(6):775-786.
57. _____.; MARSH, A.W. 1961. Irrigations based on soil suction measurements. *Soil Science Society of American Proceedings (EE.UU.)* 25(1):65-69.
58. RODE, A.A. 1970. Water regime of forest soil. In Joint FAO/ U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 113-124.
59. ROJAS, O. 1985. Estudios de las condiciones hídricas del Pacífico Norte de Costa Rica. San José, C.R., IICA. p. 9-13.
60. RUBIN, J. 1967. Numerical method for analyzing hysteresis affected, post-infiltration redistribution of soil moisture. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(1):246-251.
61. RUSSELL, M.B. 1978. Profile moisture dynamics of soil in vertisols and alfisols. In International Workshop on the Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics. Proceedings. Hyderabad, India, ICRISAT. p. 75-87.
62. RUTTER, A.J. 1967. An analysis of evaporation from a stand of scots pine. In Sopper, W.E. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Proceedings. Oxford, England, Pergamon Press. p. 403-417.
63. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. San José, C.R. IICA. p. 21-23.

64. SCHULTZ, R.C.; HEWLETT, J.D. 1978. Soil moisture as a part of the hydrologic cycle. In Balmer, W., ed. Soil moisture ... site productivity symposium. Proceeding. Myrtle Beach, EE.UU. U.S. Department of Agriculture. p. 7-21.
65. SINCH, P.; RUSSELL, M.B. 1979. Water balance and profile moisture loss patterns of an alfisol. *Agronomy Journal* (EE.UU.) 71(6): 963-966.
66. _____,; _____. 1980. Water use by a maize/pigeonpea intercrop on a deep vertisol. In International workshop on pigeonpeas. Proceedings. Patancheru, India, ICRISAT. vol. 1, p. 271-281.
67. TANNER, C.B.; JURY, W.A. 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agronomy Journal* (EE.UU.) 68(2):239-243.
68. THORNTHWAITTE, C.W.; MATHER, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Cerrerton, N.Y., Publications in climatology. v.3, no. 3, 57 p.
69. TODD, D.K. 1959. Ground water hydrology. New York, Wiley. p. 5-9.
70. TSCHAPEK, M.W. 1966. El agua en el suelo. Madrid, España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 517 p.
71. VAN BAVEL, C.H.; BRUST, K.J.; STIRK, G.B. 1968. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots. II. The water balance of the root zone. *Soil Science Society of American Proceedings* (EE.UU.) 32(3): 317-321.
72. VEINMEYER, F.J.; EDLEFSEN, N.E.; HENDRICKSON, A.H. 1943. Use of tensiometers in measuring availability of water to plants. *Plant Physiology* (EE.UU.) 18(1):66-78.
73. VERICO, S.A.; RAZUMOVA, L.A. 1966. Soil moisture and its significance in agriculture. Trad. del ruso por N. Kaner. Washington U.S. Department of Agriculture. 234 p.
74. VORONKOV, N.A. 1970. Elements of moisture circulation in forest catchments. In Joint FAO/U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 101-108.
75. ZAMBRANA, H.A. 1975. Comparación de la intercepción de la lluvia en dos tipos de bosques tropicales. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 61 p.

76. ZINKE, P.J. 1967. Forest interception studies in the United States. In Sopper, N.W. y Lull, H.W., eds. International symposium on forest hydrology. Oxford, England, Pergamon Press. p. 137-161.
77. _____. 1970. Soil moisture in forests. In Joint FAO/U.S.S.R. International symposium on forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, U.S.S.R., FAO. p. 125-132.

7. APENDICE

Cuadro 1A. Resumen acumulado de datos agroclimáticos. El CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Preparado por: Ing. Francisco Jiménez O.

Mes	TEMPERATURA (C)				PRECIPITACION (mm)			BRILLO SOLAR (hrs.)		RADIACION		HUMEDAD RELATIVA (%)		EVAPORACION (mm)	
	Max.	Promedio Min.	Media horaria Max.	Absoluta Min.	Prom. Mens.	Max. 24 hr.	Prom. con 0.1 mm ó más	mens. Promedio diario	Mensual cal/cm ² /mes	Diario cal/cm ² /día	Prom. Diaria Mens.	Prom. Mens.	Tanque A Prom. Mens. Diario	Prom. Mens.	Diario
Enero	25,10	16,50	20,29	29,90	11,70	167,3	18,2	149,9	4,84	12487	402,8	86,8	87,5	2,82	
Febrero	25,40	16,57	20,43	30,50	11,50	138,5	15,2	140,0	4,95	12123	428,5	86,0	89,6	3,17	
Marzo	26,32	17,21	21,25	31,00	12,40	74,4	13,7	162,5	5,24	14877	479,9	84,8	119,4	3,85	
Abril	26,93	18,09	21,89	31,50	13,20	125,5	14,9	157,5	5,25	13854	461,8	84,9	117,8	3,93	
Mayo	27,63	18,85	22,46	31,60	14,20	229,8	23,2	152,7	5,12	14562	469,8	86,7	114,3	3,69	
Junio	27,27	18,94	22,23	30,40	16,20	281,7	24,8	126,3	4,21	12466	415,6	88,6	91,7	3,06	
Julio	26,58	18,58	21,80	31,50	15,10	279,9	25,3	117,0	3,77	12082	389,7	88,8	85,0	2,74	
Agosto	26,80	18,53	21,83	30,00	15,70	247,3	25,2	133,3	4,30	13107	422,8	88,5	91,1	2,94	
Setiembre	27,19	18,52	21,98	29,80	15,60	259,0	23,0	134,9	4,50	13385	446,2	88,1	98,4	3,28	
Octubre	26,96	18,51	21,88	31,00	15,00	251,3	24,2	146,9	4,74	13533	436,5	88,5	99,1	3,20	
Noviembre	25,85	18,21	21,35	32,00	13,70	277,2	22,5	127,1	4,24	11276	375,9	89,4	80,7	2,69	
Diciembre	25,19	17,10	20,54	29,00	10,60	309,7	21,1	127,8	4,12	11189	360,9	88,4	76,9	2,48	
TOTAL	317,22	215,61	257,93	368,20	164,40	2641,6	251,3	1675,9	55,28	154941	5090,4	1049,5	1151,5	37,85	
PROMEDIO	26,43	17,97	21,50	30,68	13,74	220,1	20,9	139,7	4,60	12912	424,2	87,5	96,0	3,15	
Observaciones en el período: Temperatura 1968-1985(18 años) Radiación 1968-1985(18 años)															
Precipitación 1949-1985(37 años) Humedad R. 1968-1985(18 años)															
Brillo solar 1968-1985(18 años) Evaporación 1968-1985(18 años)															

Estación Agrometeorológica Lat 9°53' N. Long. 83°38' O.
Elevación: 602 msnm

Cuadro 2A. Factores de ponderación de la tensión del agua en el suelo, de acuerdo al área ocupada por cada estrato en el sistema agroforestal café-poró.

Período	ESTRATOS			
	Bajo el árbol	Bajo el árbol y el café	Bajo el café	Entre hileras de café
1-30 JUL*	**	**	0,8385	0,1605
1-20 AGO	0,0185	**	0,8272	0,1543
21-31 AGO	0,0253	**	0,8240	0,1506
1-10 SET	0,0389	0,0580	0,7611	0,1419
11-30 SET	0,0451	0,0987	0,7197	0,1364
1-20 SET	0,0488	0,1358	0,6864	0,1290
21-31 OCT	0,0537	0,1951	0,6277	0,1234
1-10 NOV	0,0537	0,1951	0,6277	0,1234
11-30 NOV	0,0586	0,2963	0,5623	0,1198
1-31 DIC	0,0623	0,2963	0,5272	0,1148
1-31 ENE	0,0623	0,2963	0,5272	0,1148

* La fecha de poda de los árboles fue el 1º de julio.

** Los valores de tensión medidos en esos períodos bajo el árbol se promediaron con los obtenidos entre hileras de café y las medidas bajo el árbol y el café se promediaron con los obtenidos bajo el café.

Cuadro 3A. Factores de ponderación de la lluvia de acuerdo al área ocupada por cada estrato en el sistema agroforestal café-poró.

Período	ESTRATOS			
	Bajo el árbol	Bajo el árbol y el café	Bajo el café	Entre hileras de café
1-31 JUL	**	**	0,8385	0,1605
1-20 AGO	**	**	0,8427	0,1572
21-31 AGO	0,0253	**	0,8240	0,1506
1-10 SET	0,0265	0,0703	0,7611	0,1419
11-30 SET	0,0327	0,1100	0,7197	0,1364
1-20 OCT	0,0364	0,1481	0,6864	0,1290
21-31 OCT	0,0414	0,2074	0,6277	0,1234
1-10 NOV	0,0414	0,2074	0,6277	0,1234
11-30 NOV	0,0463	0,2716	0,5623	0,1198
1-31 DIC	0,0500	0,3086	0,5272	0,1148
1-31 ENE	0,0500	0,3086	0,5272	0,1148

* La fecha de poda de los árboles fue el 1º de julio.

** Los valores de lluvia medidos en esos períodos bajo el árbol se promediaron con los obtenidos entre hileras de café y los medidos bajo el árbol y el café se promediaron con los obtenidos bajo el café.

Cuadro 4A. Factores de poderación de la lluvia y la tensión del agua en el suelo, de acuerdo al área ocupada por cada estrato en el sistema agroforestal café-laurel.

Estrato	Factor de ponderación
Bajo el árbol de laurel	0,0900
Bajo el árbol de laurel y el café	0,3108
Bajo el café	0,4423
Entre hileras de café	0,1569

Cuadro 5A. Datos meteorológicos obtenidos durante los seis meses anteriores y durante el transcurso de la investigación en la estación agrometeorológica "La Montaña".

Mes	Temperatura (°C)		Precipitación (mm)	Brillo Solar (horas/día)	Radiación Solar (cal/cm ² día)	Humedad Relativa (%)	Evaporación (mm)	
	Max.	Med. Min.						
ENE	25,4	20,0	15,2	27,2	5,9	442	85,6	112,5
FEB	25,3	20,2	16,3	117,2	4,5	400	88,9	88,6
MAR	26,5	29,8	15,9	22,5	6,0	522	87,0	135,9
ABR	27,4	21,6	17,0	29,4	6,1	530	87,3	141,5
MAY	28,4	22,8	18,5	96,6	5,2	503	88,1	142,7
JUN	26,9	22,3	19,1	222,4	2,5	377	92,1	89,8
JUL	29,0	21,8	18,0	115,2	3,9	416	90,1	105,5
AGO	26,8	21,5	18,0	285,6	3,7	409	89,1	97,1
SET	27,4	22,2	18,3	294,9	4,9	445	88,4	107,4
OCT	27,2	21,8	18,1	249,5	5,2	430	89,1	107,3
NOV	26,1	21,2	17,4	232,6	4,3	359	90,3	88,2
DIC	25,6	20,4	16,4	102,7	3,7	330	90,7	88,2
ENE	24,5	19,7	15,5	268,2	3,9	348	90,6	87,3

Cuadro 6A. Cantidad de agua de lluvia* (mm) medida en los diferentes estratos de muestreo en el sistema agroforestal café-poró.

Mes	Década	ESTRATOS			
		Bajo el árbol	Bajo el árbol y el café	Bajo el café	Entre hileras de café
JUL	1-10	33,3	35,6	15,7	43,1
JUL	11-20	36,3	40,6	19,9	38,7
JUL	21-31	42,1	64,2	28,2	40,6
AGO	1-10	87,1	95,2	53,1	105,1
AGO	11-20	24,2	33,4	14,1	27,4
AGO	21-31	159,5	165,6	83,5	154,3
SET	1-10	121,6	171,1	84,6	142,3
SET	11-20	17,9	19,3	7,2	21,7
SET	21-30	114,5	128,9	91,9	135,5
OCT	1-10	16,4	18,4	8,4	21,2
OCT	11-20	159,7	159,2	105,6	135,8
OCT	21-31	83,7	87,2	51,6	90,2
NOV	1-10	115,0	140,0	105,4	147,0
NOV	11-20	38,7	50,0	29,2	57,2
NOV	21-30	16,7	22,0	11,0	24,0
DIC	1-10	58,7	65,4	38,8	81,0
DIC	11-20	0,0	0,0	0,0	0,0
DIC	21-31	6,7	4,3	4,6	8,5
ENE	1-10	32,9	30,8	23,9	43,3
ENE	11-20	169,0	155,4	137,7	219,2
ENE	21-31	30,8	26,4	23,6	33,0
TOTAL		1364,8	1513,0	938,0	1570,0

* Promedio de tres repeticiones

Cuadro 7A. Cantidad de agua de lluvia* (mm) medida en los diferentes estratos de muestreo en el sistema agroforestal café-lau-rel.

Mes	Década	ESTRATOS			
		Bajo el árbol	Bajo el árbol y el café	Bajo el café	Entre hileras de café
AGO	1-10	87,6	100,1	64,6	86,1
AGO	11-20	26,4	30,3	19,9	27,9
AGO	21-31	160,6	170,2	112,6	165,9
SET	1-10	129,8	156,5	94,2	122,5
SET	11-20	17,0	18,0	12,8	17,0
SET	21-30	133,7	141,1	90,9	128,6
OCT	1-10	16,9	19,1	13,0	13,9
OCT	11-20	145,9	154,6	111,9	132,8
OCT	21-31	90,4	83,9	62,8	77,8
NOV	1-10	132,9	129,3	107,6	131,0
NOV	11-20	51,1	47,0	36,5	49,1
NOV	21-30	20,0	20,5	16,3	19,3
DIC	1-10	73,1	73,0	50,5	64,6
DIC	11-20	0,0	0,0	0,0	0,0
DIC	21-31	8,5	8,6	6,5	8,0
ENE	1-10	36,9	37,6	27,6	35,8
ENE	11-20	189,7	185,3	141,0	180,8
ENE	21-31	33,2	33,0	23,0	32,5
TOTAL		1353,7	1408,1	991,7	1293,6

* Promedio de tres repeticiones

Cuadro 8A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
JUL	1-10	138	44,8	124	44,0	95	43,5	77	49,5
JUL	11-20	108	45,6	114	44,2	87	43,7	70	49,7
JUL	21-31	118	45,3	118	44,1	93	43,5	71	49,7
AGO	1-10	69	47,0	82	45,2	66	44,7	49	50,6
AGO	11-20	117	45,3	109	44,4	80	44,0	55	50,3
AGO	21-31	84	46,4	84	45,1	62	44,9	39	51,2
SET	1-10	77	46,7	81	45,2	66	44,7	49	50,6
SET	11-20	139	44,8	112	44,3	86	43,8	63	50,0
SET	21-31	153	44,5	110	44,3	82	43,9	57	50,2
OCT	1-10	201	43,6	181	42,9	140	42,2	99	48,8
OCT	11-20	192	43,8	138	43,6	114	42,9	84	49,2
OCT	21-31	87	46,3	92	44,8	78	44,1	66	49,9
NOV	1-10	72	46,8	79	45,3	63	44,8	52	50,4
NOV	11-20	81	46,5	95	44,7	79	45,4	68	49,8
NOV	21-30	132	45,0	136	43,7	109	44,4	87	49,2
DIC	1-10	93	46,1	125	43,9	117	42,8	101	48,8
DIC	11-20	153	44,5	127	43,9	97	43,4	75	49,5
DIC	21-31	380	41,6	269	41,7	200	41,1	136	48,0
ENE	1-10	180	44,0	234	42,1	244	40,4	198	47,1
ENE	11-20	90	46,2	123	44,0	115	42,8	109	48,6
ENE	21-31	132	45,0	129	43,9	98	43,4	71	49,7

* TENS. = Tensión (mb)

H.V. = Humedad volumétrica (%).

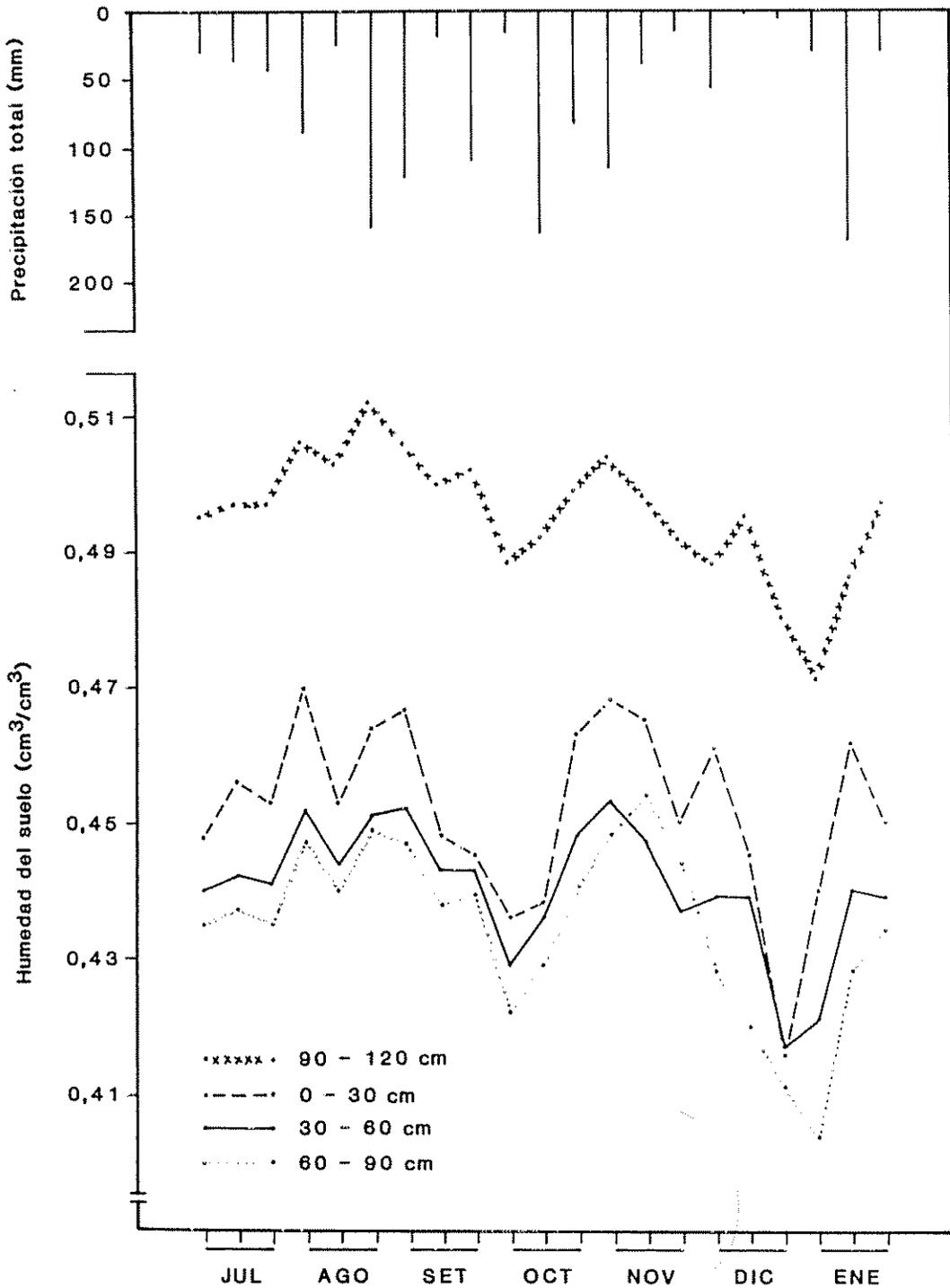


Fig. 1A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró.

Cuadro 9A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo árbol de poró y café.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
JUL	1-10	122	45,2	113	44,2	88	43,7	59	50,1
JUL	11-20	90	46,1	99	44,6	76	44,2	53	50,4
JUL	21-31	102	45,8	105	44,4	85	43,8	65	49,9
AGO	1-10	71	46,9	79	45,3	61	44,9	53	50,4
AGO	11-20	110	45,5	106	44,4	71	44,4	59	50,1
AGO	21-31	80	46,5	78	45,3	56	45,2	42	51,0
SET	1-10	70	47,0	78	45,3	65	44,7	48	50,6
SET	11-20	128	45,0	117	44,1	90	43,6	67	49,8
SET	21-30	144	44,7	113	44,2	86	43,8	59	50,1
OCT	1-10	183	43,9	166	43,1	127	42,5	94	49,0
OCT	11-20	159	44,4	142	43,6	109	43,0	80	49,4
OCT	21-31	90	46,1	89	44,9	78	44,1	58	50,2
NOV	1-10	75	46,8	75	45,4	62	44,8	42	51,0
NOV	11-20	86	46,3	86	45,0	75	44,2	50	50,5
NOV	21-30	122	45,2	120	44,6	101	43,3	74	49,6
DIC	1-10	86	46,3	104	44,5	106	43,1	84	49,2
DIC	11-20	142	44,7	113	44,2	92	43,6	66	49,8
DIC	21-31	349	41,9	251	41,9	197	41,1	127	48,2
ENE	1-10	164	44,3	182	42,8	197	41,1	175	47,4
ENE	11-20	86	46,3	94	44,8	87	43,8	93	49,0
ENE	21-31	132	44,9	117	44,1	99	43,3	69	49,7

* TENS. = Tensión (mb)

H.V. = Humedad volumétrica (%).

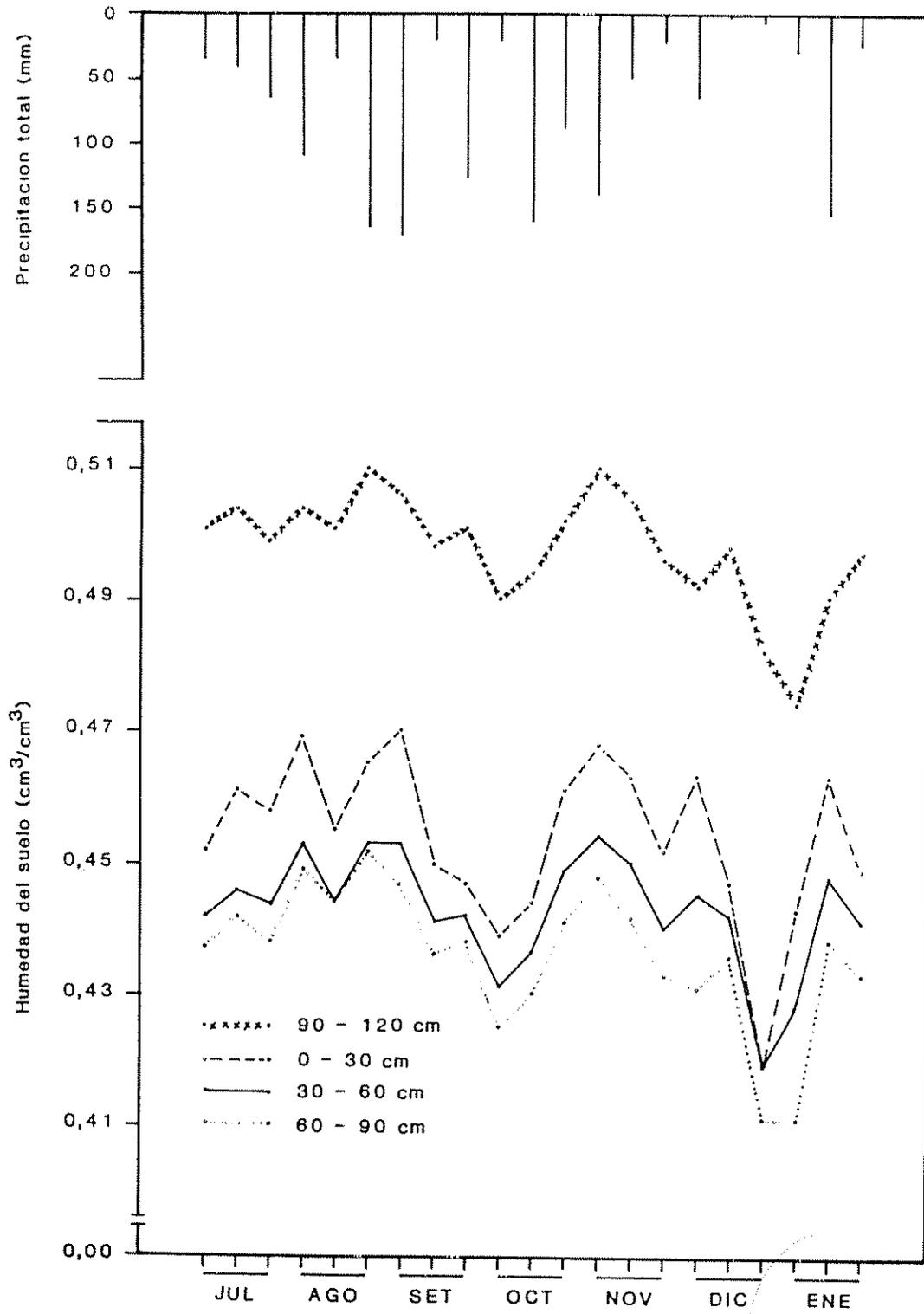


Fig. 2A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el árbol de poró y el café.

Cuadro 10A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el café.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
JUL	1-10	129	45,0	108	44,4	81	44,0	57	50,2
JUL	11-20	110	45,5	100	44,6	76	44,2	51	50,5
JUL	21-31	125	45,1	110	44,3	91	43,6	62	50,0
AGO	1-10	72	46,8	76	45,4	61	44,9	46	50,7
AGO	11-20	121	45,2	97	44,7	70	44,5	49	50,6
AGO	21-31	82	46,5	75	45,4	55	45,2	34	51,5
SET	1-10	75	46,8	76	45,4	61	44,9	40	51,1
SET	11-20	136	44,9	100	44,6	74	44,3	51	50,5
SET	21-30	152	44,5	99	44,6	70	44,4	46	50,7
OCT	1-10	268	42,7	177	42,9	119	42,7	84	49,2
OCT	11-20	202	43,6	136	43,7	96	43,4	70	49,7
OCT	21-31	83	46,4	83	45,1	70	44,4	51	50,5
NOV	1-10	66	47,1	71	45,6	57	45,1	42	51,0
NOV	11-20	104	45,7	108	44,4	87	43,7	73	49,6
NOV	21-30	115	45,4	115	44,2	91	43,6	69	49,7
DIC	1-10	89	46,2	102	44,5	91	43,6	75	49,5
DIC	11-20	137	44,8	114	44,2	82	43,9	63	49,9
DIC	21-31	351	41,9	224	42,2	146	42,0	99	48,8
ENE	1-10	161	44,3	171	43,0	163	41,7	131	48,1
ENE	11-20	83	46,4	90	44,9	76	44,1	65	49,9
ENE	21-31	122	45,2	110	44,3	85	43,8	62	50,0

* TENS. = Tensión (mb).

H.V. = Humedad volumétrica (%).

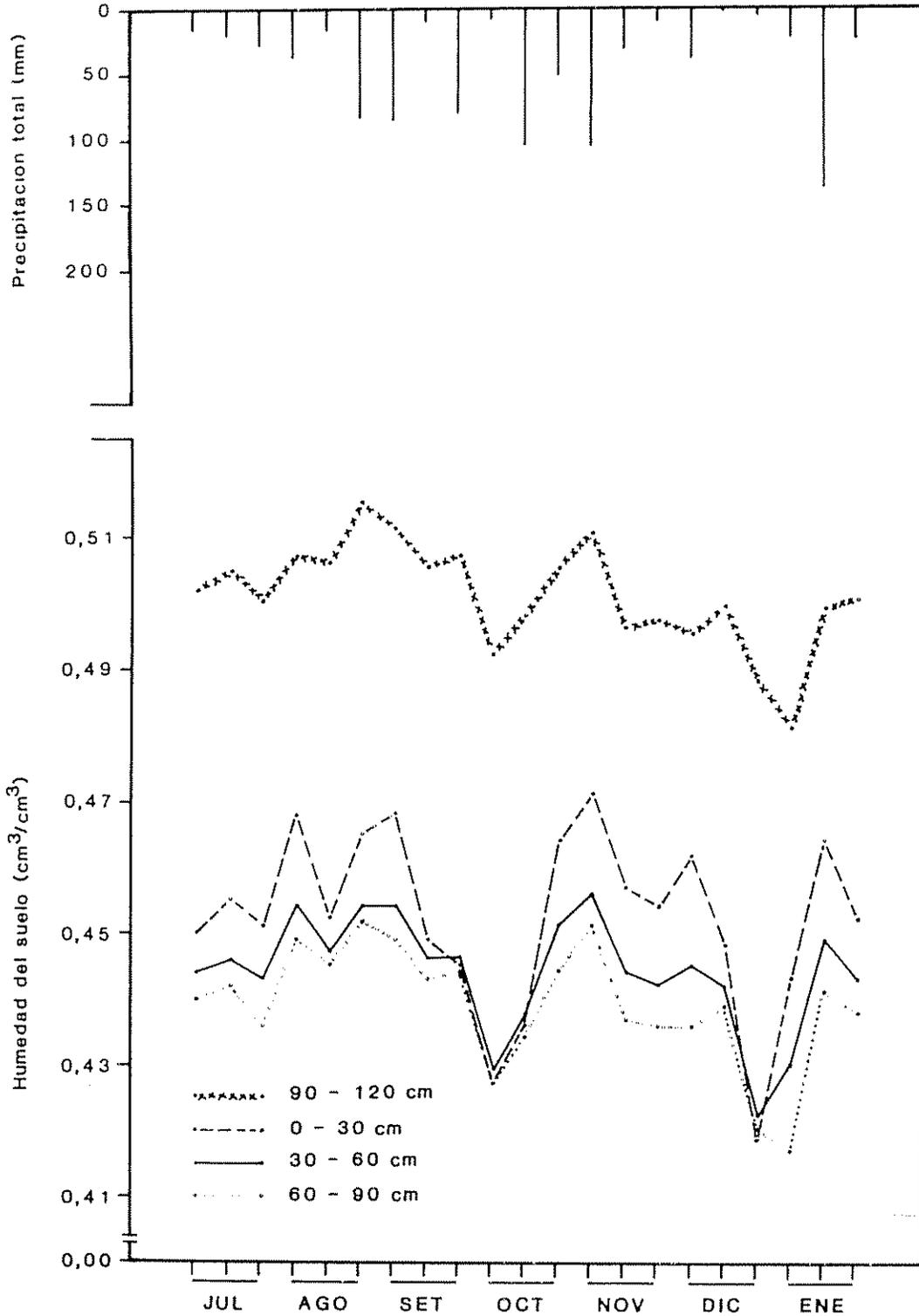


Fig. 3A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato bajo el café.

Cuadro 11A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-poró, estrato entre hileras de café.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
JUL	1-10	113	45,4	111	44,3	86	43,8	51	50,5
JUL	11-20	93	46,0	100	44,6	78	44,1	59	50,1
JUL	21-31	96	45,9	102	44,5	84	43,9	66	49,8
AGO	1-10	65	47,2	81	45,2	66	44,6	51	50,5
AGO	11-20	98	45,9	99	44,6	73	44,3	59	50,1
AGO	21-31	78	46,6	78	45,3	55	45,2	42	51,0
SET	1-10	74	46,8	77	45,4	63	44,8	48	50,7
SET	11-20	123	45,2	104	44,5	80	44,0	55	50,3
SET	21-30	132	44,9	102	44,5	78	44,1	47	50,7
OCT	1-10	138	44,8	145	43,5	117	42,8	86	49,2
OCT	11-20	117	45,3	114	44,2	90	43,6	62	50,0
OCT	21-31	74	46,8	83	45,1	71	44,4	55	50,3
NOV	1-10	66	47,1	72	45,5	58	45,0	42	51,0
NOV	11-20	68	47,0	82	45,1	70	44,4	56	50,3
NOV	21-30	100	45,8	106	44,4	90	43,6	70	49,7
DIC	1-10	67	47,1	91	44,9	90	43,6	74	49,6
DIC	11-20	123	45,2	111	44,3	88	43,7	65	49,9
DIC	21-31	210	43,5	198	42,6	154	41,9	106	48,7
ENE	1-10	100	45,8	135	43,7	139	42,2	125	48,3
ENE	11-20	70	46,9	79	45,3	68	44,5	61	50,0
ENE	21-31	106	45,6	105	44,4	87	43,7	65	49,9

* TENS. = Tensión (mb)

H.V. = Humedad volumétrica (%).

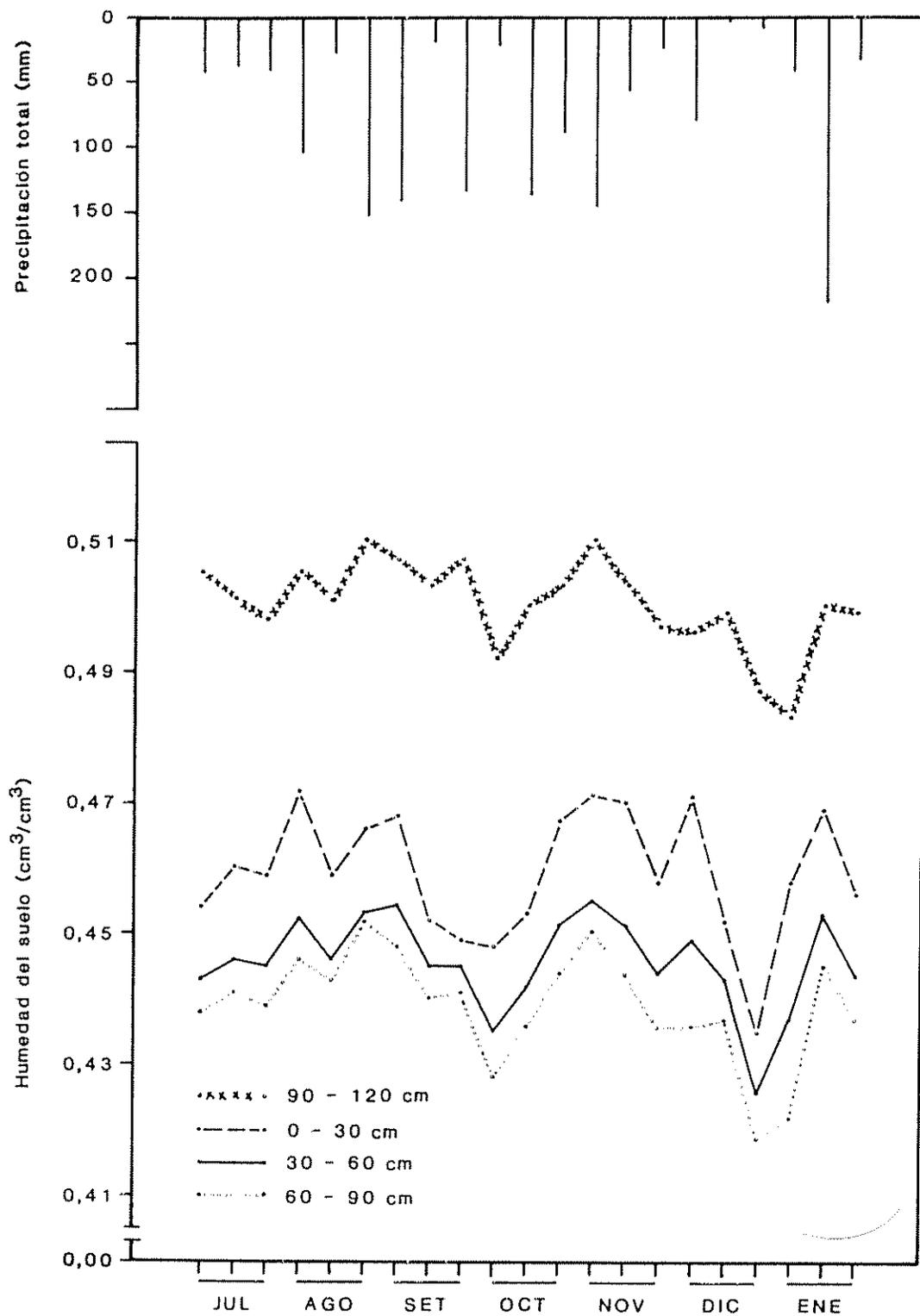


Fig. 4A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-poró, estrato entre hileras de café.

Cuadro 12A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
AGO	1-10	62	47,3	65	45,8	111	42,9	43	50,9
AGO	11-20	162	44,3	136	43,7	145	42,1	33	51,6
AGO	21-31	94	46,0	92	44,8	96	43,4	25	52,3
SET	1-10	103	45,7	94	44,8	103	43,2	21	52,7
SET	11-20	198	43,7	189	42,7	195	41,1	37	51,3
SET	21-30	253	42,9	245	42,0	163	41,7	34	51,5
OCT	1-10	468	41,0	612	37,5	557	39,6	90	49,1
OCT	11-20	459	41,0	582	37,6	362	40,8	114	48,5
OCT	21-31	105	45,7	99	44,6	121	44,8	44	50,9
NOV	1-10	65	47,2	58	46,2	57	45,1	33	51,6
NOV	11-20	76	46,7	77	45,4	81	44,0	42	51,0
NOV	21-30	210	43,5	286	41,5	244	40,4	69	49,7
DIC	1-10	130	45,0	236	40,5	311	41,3	94	48,9
DIC	11-20	295	42,4	217	42,3	165	41,7	59	50,3
DIC**	21-31	1198	38,0	998	35,9	716	38,8	90	49,1
ENE	1-10	444	41,2	617	37,4	677	39,0	111	48,5
ENE	11-20	87	46,3	410	38,7	382	40,7	58	50,2
ENE	21-31	278	42,6	284	41,5	248	40,4	64	49,9

* TENS. = Tensión (mb).

H.V. = Humedad volumétrica (%).

** Los datos de 0-90 cm de profundidad fueron estimados.

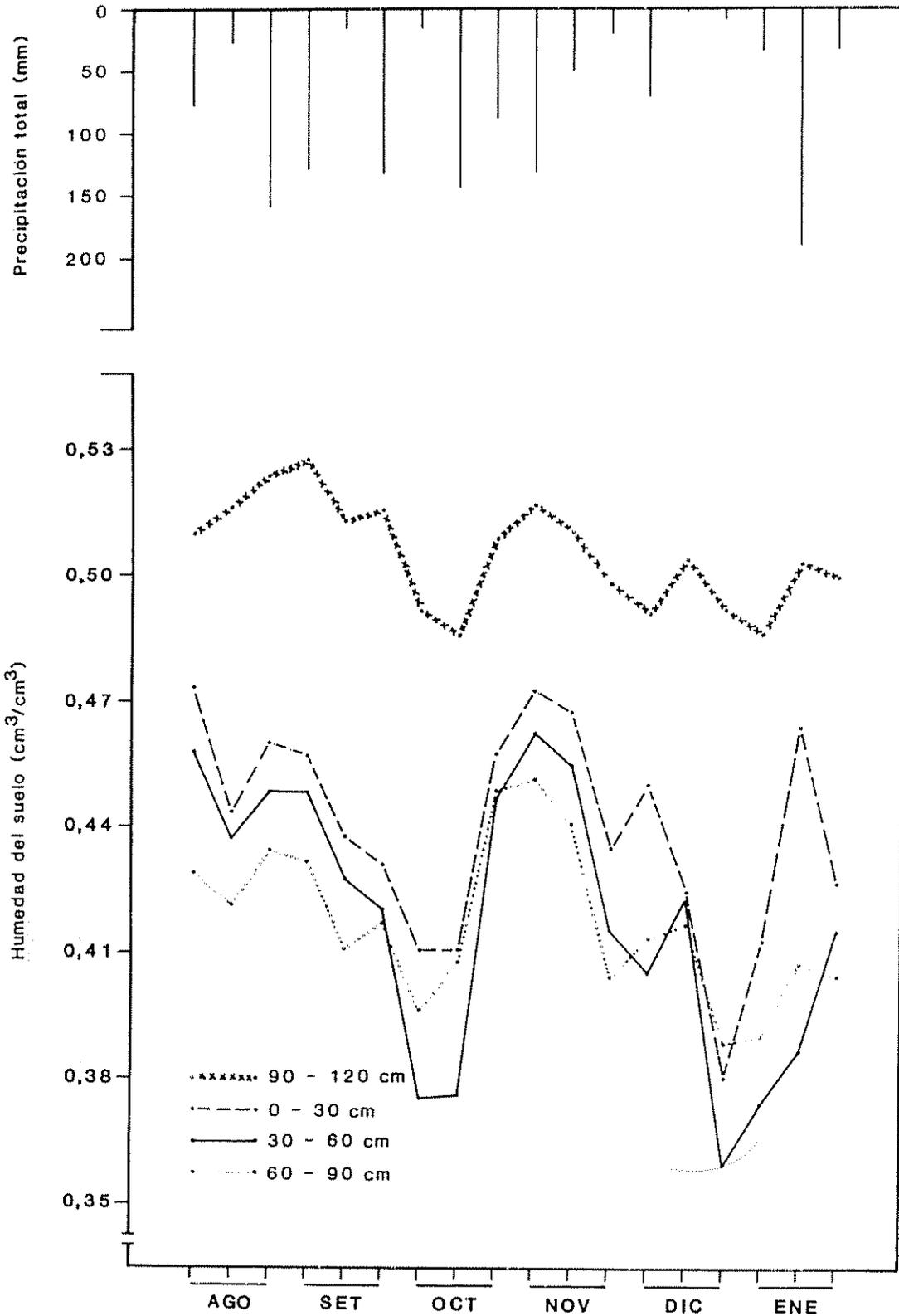


Fig. 5A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal cafe-laurel, estrato bajo el árbol de laurel.

Cuadro 13A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel y café.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
AGO	1-10	90	46,1	119	44,1	202	40,7	66	49,8
AGO	11-20	243	43,0	189	42,7	133	42,4	44	50,9
AGO	21-31	129	45,0	122	44,0	97	43,4	34	51,5
SET	1-10	129	45,0	117	44,1	93	43,5	34	51,5
SET	11-20	266	42,7	225	42,2	167	41,6	50	50,6
SET	21-30	315	42,2	251	41,9	181	41,4	49	50,6
OCT	1-10	606	40,2	644	37,3	586	39,4	88	49,1
OCT	11-20	543	40,5	573	37,7	440	40,2	81	49,3
OCT	21-31	136	44,9	114	44,2	128	42,5	67	49,8
NOV	1-10	79	46,6	73	45,5	62	44,8	38	51,2
NOV	11-20	101	45,8	92	44,8	80	44,0	47	50,7
NOV	21-30	310	42,3	291	41,4	295	39,8	71	49,7
DIC	1-10	205	43,6	386	38,9	427	40,3	81	49,3
DIC	11-20	359	41,8	246	42,0	173	43,7	58	50,2
DIC**	21-31	1427	37,5	984	35,9	818	38,4	104	48,7
ENE	1-10	510	40,7	774	36,7	814	38,5	103	48,5
ENE	11-20	164	44,3	412	38,7	439	40,3	56	50,3
ENE	21-31	406	41,4	313	41,3	297	41,9	66	49,9

* TENS. = Tensión (mb)

H.V. = Humedad volumétrica (%)

** Los datos de 0-90 cm de profundidad fueron estimados.

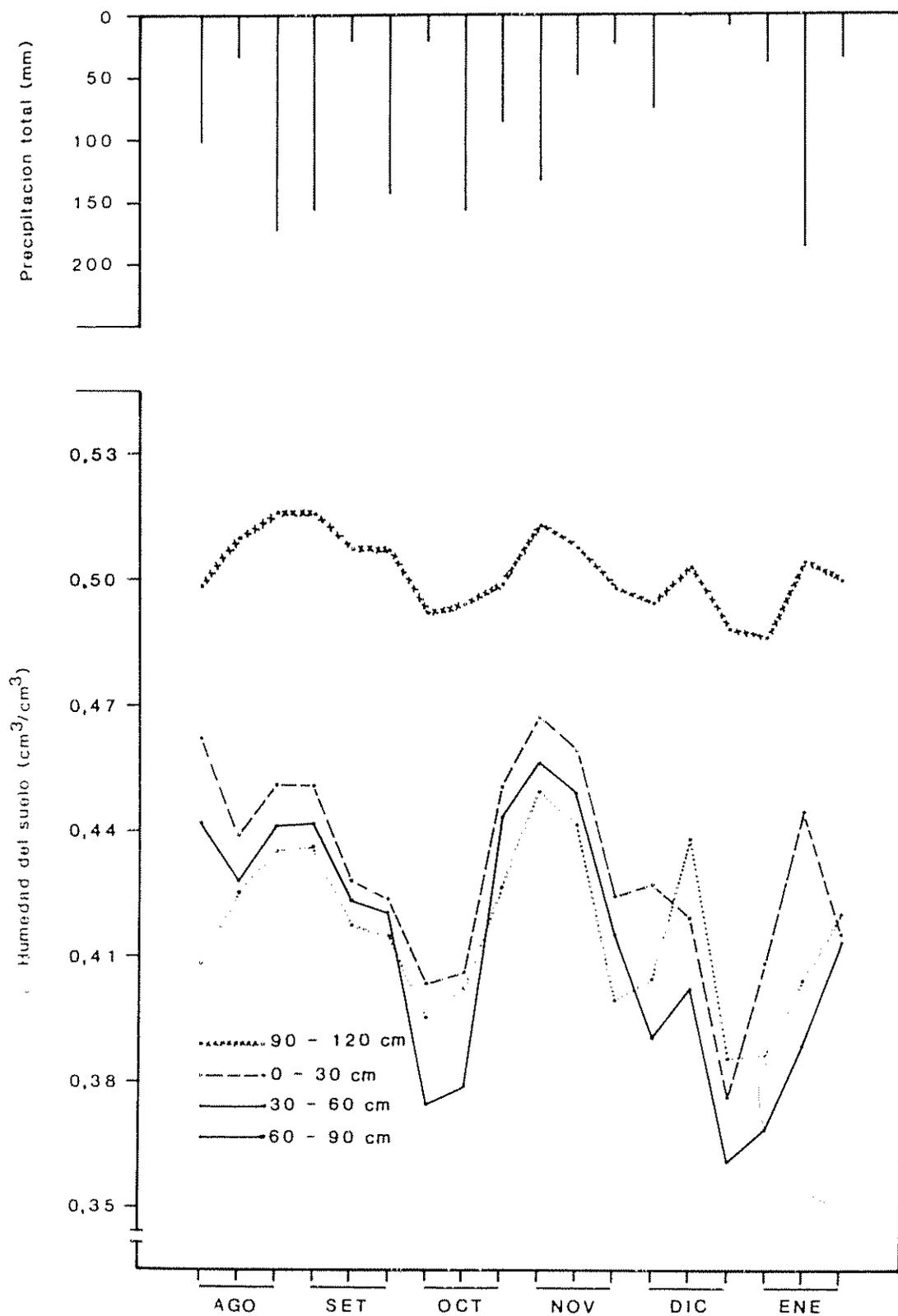


Fig.6A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el árbol de laurel y el café.

Cuadro 14A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el café.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
AGO	1-10	64	47,2	71	45,6	52	45,4	25	52,3
AGO	11-20	149	44,6	94	44,8	66	44,6	30	51,8
AGO	21-31	90	46,2	74	45,5	55	45,2	23	52,5
SET	1-10	80	46,5	70	45,6	57	45,1	27	52,1
SET	11-20	157	44,4	93	44,8	66	44,6	31	51,7
SET	21-30	174	44,1	90	44,9	58	45,1	30	51,8
OCT	1-10	343	42,0	197	42,6	114	42,9	55	50,3
OCT	11-20	298	42,4	174	43,0	100	43,3	46	50,8
OCT	21-31	74	46,8	67	45,8	48	45,7	29	51,9
NOV	1-10	58	47,5	57	46,2	40	46,2	23	52,4
NOV	11-20	72	46,8	69	45,7	48	45,7	28	52,0
NOV	21-30	121	45,2	104	44,5	72	44,4	42	51,0
DIC	1-10	88	46,2	99	44,6	78	44,1	50	50,6
DIC	11-20	141	44,8	96	44,7	62	44,8	35	51,4
DIC	21-31	529	40,6	231	42,1	138	42,3	68	49,8
ENE	1-10	244	43,0	262	41,8	188	41,3	90	49,1
ENE	11-20	112	45,5	129	43,8	106	43,1	52	50,4
ENE	21-31	143	44,7	102	44,6	75	44,2	44	50,9

* TENS. = Tensión (mb)

H.V. = Humedad volumétrica (%).

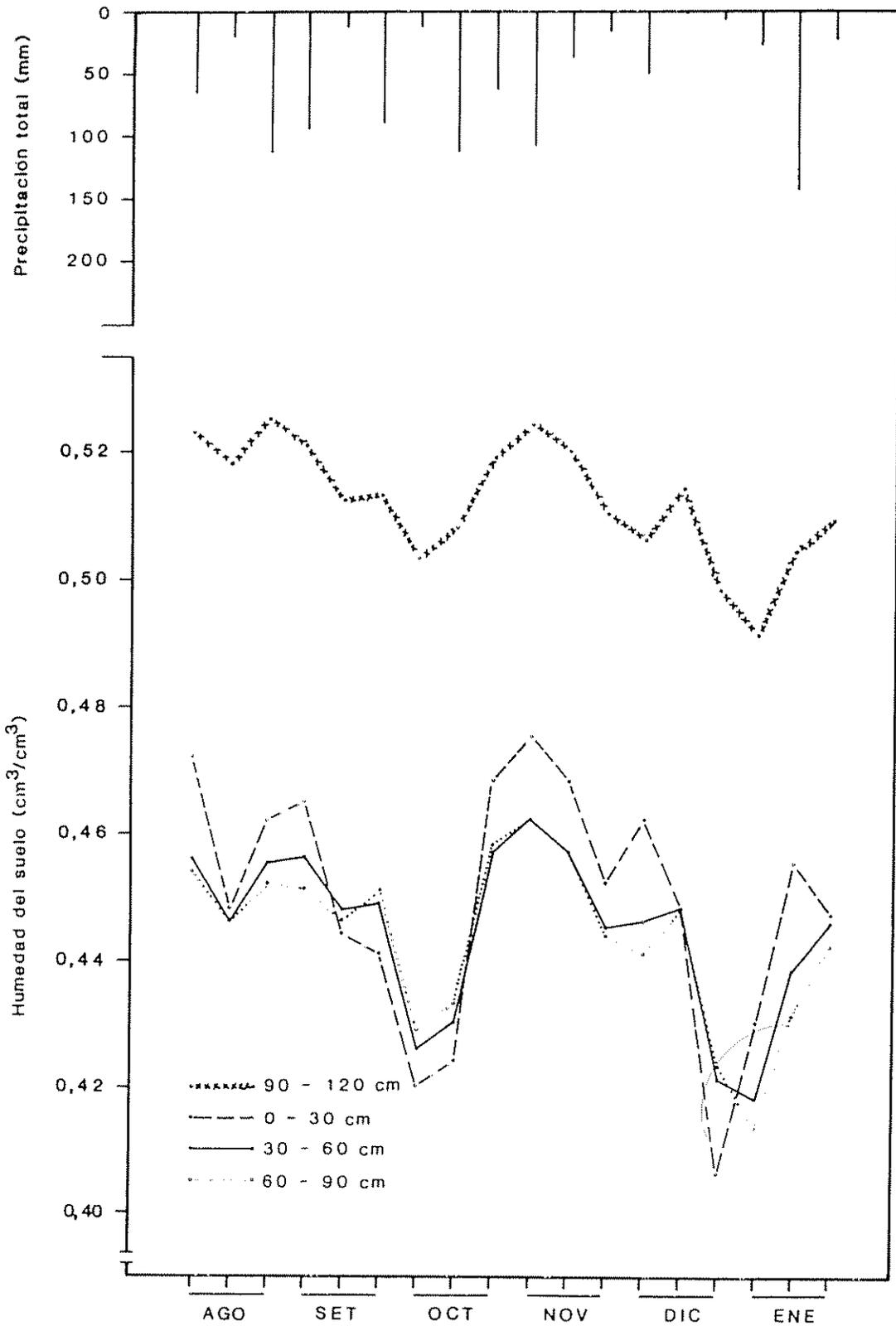


Fig. 7A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café-laurel, estrato bajo el café.

Cuadro 15A. Distribución decádica de la tensión y la humedad promedio del suelo en el sistema agroforestal café-laurel, estrato entre hileras de café.

Mes	Década	PROFUNDIDAD (cm)							
		0-30		30-60		60-90		90-120	
		TENS.*	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.	TENS.	H.V.
AGO	1-10	61	47,4	72	45,5	68	44,6	55	50,3
AGO	10-20	124	45,2	98	44,6	67	44,6	46	50,8
AGO	21-31	79	46,6	80	45,2	65	44,7	34	51,5
SET	1-10	70	46,9	82	45,2	60	45,0	35	51,5
SET	11-20	135	44,9	98	44,6	78	44,1	43	50,9
SET	21-30	148	44,6	97	44,7	66	44,6	36	51,3
OCT	1-10	253	42,9	210	42,4	139	42,2	69	49,7
OCT	11-20	268	42,7	193	42,7	118	42,8	58	50,2
OCT	21-31	74	46,8	73	45,5	55	45,2	40	51,1
NOV	1-10	61	47,4	65	45,9	48	45,7	34	51,5
NOV	11-20	74	46,8	78	45,3	74	44,3	53	50,4
NOV	21-30	114	45,4	117	44,1	82	43,9	54	50,4
DIC	1-10	84	46,4	117	44,1	97	43,4	67	49,8
DIC	11-20	143	44,7	105	44,5	70	44,4	47	50,7
DIC	21-31	522	40,6	275	41,6	164	41,7	78	49,4
ENE	1-10	247	43,0	334	41,1	248	40,4	104	48,7
ENE	11-20	105	45,7	151	43,4	114	42,9	62	50,1
ENE	21-31	140	44,8	120	44,1	94	43,5	50	50,7

* TENS. = Tensión (mb)

H.V. = Humedad volumétrica (%).

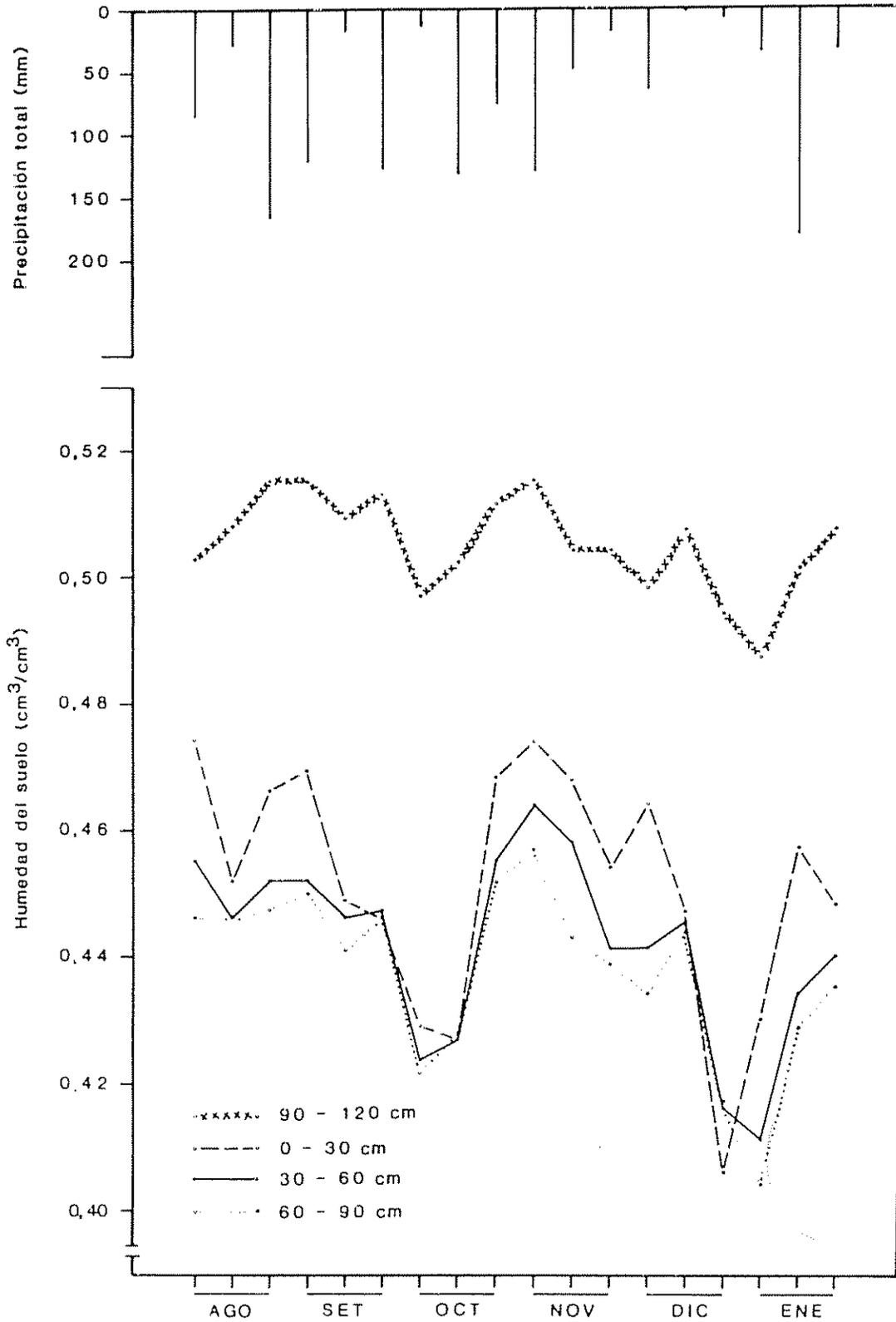


Fig. 8A- Distribución decádica de la humedad del suelo y la precipitación en el sistema agroforestal café + laurel, estrato entre hileras de café.