

POSTGRADO ECOLOGIA TROPICAL
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES



DINAMICA HIDRICA, DE NUTRIENTES Y EROSION EN DOS FORMAS DE MANEJO
DEL CULTIVO DEL CAFE EN LOS ANDES DEL EDO. MERIDA

Tesis presentada por:
MICHELE ATAROFF SOLER
ante la Universidad de Los Andes como
requisito parcial para optar al grado
de DOCTOR EN ECOLOGIA TROPICAL.

Mérida, enero 1990.

VEREDICTO

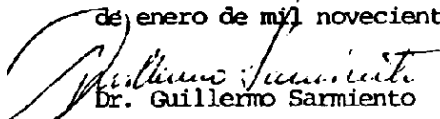
Quienes suscriben, integrantes del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ciencias con fecha 22/01/90, para conocer y emitir veredicto sobre la Tesis presentada por MICHELE ATAROFF SOLER para optar al título de Doctor en Ecología Tropical y que se titula:

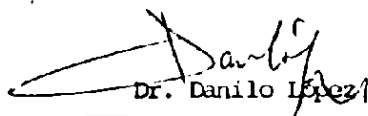
DINAMICA HIDRICA, DE NUTRIENTES Y EROSION EN DOS FORMAS DE MANEJO DEL CULTIVO DEL CAFE EN LOS ANDES DEL EDO. MERIDA

hacen constar lo siguiente:

PRIMERO: Que hoy, 25/01/90, a las 3:30 p.m., nos constituimos como Jurado en el aula A-1 de la Facultad de Ciencias y designamos como Presidente del Jurado al Dr. Guillermo Sarmiento. SEGUNDO: A continuación procedimos a discutir el trabajo presentado a nuestra consideración con el fin de decidir si se procedía a su defensa pública. Luego de considerar las observaciones y críticas de cada jurado, acordamos por unanimidad autorizar su presentación. TERCERO: A las 4:30 p.m. de este mismo día, el Jurado se reunió en el aula A-1 de esta Facultad y se procedió al acto público de sustentación del Trabajo de Tesis presentado, a requerimiento del Jurado. CUARTO: Una vez concluida la sustentación correspondiente, el Jurado interrogó a la aspirante sobre diversos aspectos a que el trabajo se refiere. QUINTO: Seguidamente, el Presidente del Jurado invitó al público asistente a formular preguntas y observaciones sobre el trabajo presentado. SEXTO: Una vez concluido el acto de presentación, el Jurado procedió a su deliberación final y concluyó que: SE APRUEBA LA TESIS DOCTORAL PRESENTADA A NUESTRA CONSIDERACION, CON MENCION HONORIFICA

En fe de lo cual firman en Mérida, a los veinticinco días del mes de enero de mil novecientos noventa.


Dr. Guillermo Sarmiento


Dr. Danilo López


Dra. Maximina Monasterio



ESTE TRABAJO
HA SIDO REALIZADO EN EL GRUPO DE ECOLOGÍA DE AGROECOSISTEMAS DEL
CIELAT
(CENTRO DE INVESTIGACIONES ECOLÓGICAS DE LOS ANDES TROPICALES)
FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
BAJO LA DIRECCION DE LA DRA. MAXIMINA MONASTERIO (TUTORA)

ESTE TRABAJO FORMA PARTE DEL PROGRAMA :
"TROPICAL MOUNTAIN ECOSYSTEMS"
DE I.U.B.S. Y MAB/UNESCO

Al

CIELAT

CENTRO DE INVESTIGACIONES ECOLOGICAS DE LOS ANDES TROPICALES

de la Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes

que representa la nueva etapa de desarrollo del antiguo Grupo de Ecología Vegetal, integrado por ese equipo humano entusiasta y cálido a quien debo, entre muchas cosas, toda mi formación como ecóloga

AGRADECIMIENTOS

Estoy altamente agradecida:

a la familia Mora, dueños de los cafetales en los que hemos trabajado, quienes nos han recibido con tanto cariño y nos han brindado la mayor colaboración

a mi tutora Maximina Monasterio por su interés y ayuda, y en especial por su confianza

a Hely Saul Rangel con quien he compartido varios años de trabajo de campo, y así mismo a Luis Gonzalez y Luis Nieto quienes han colaborado intensamente en distintas etapas. Su ayuda en este trabajo es invaluable

a Guillermo Sarmiento por las interesantes discusiones que hemos tenido y a Mario Farifas quien aligeró enormemente mi carga docente

al Laboratorio de Espectroscopia Molecular de la Fac. de Ciencias, U.L.A., a cargo de los Drs. Marcela de Burguera y José L. Burguera

al Laboratorio de Suelos del Instituto de Geografía, U.L.A., en especial al Prof. Jorge Pereira

a Cesar Zambrano, por su apoyo en Canaguá

a los muchos amigos que nos han ayudado en el trabajo de campo

a Pascual Soriano, sin cuya comprensión y cariño este trabajo no hubiera sido posible

a las Instituciones que han contribuido con aportes financieros:

CONICIT REGIONAL LOS ANDES, Proyecto CRA-001-87

CONICIT, Proyecto SI-1970

CDCHT-ULA, Proyecto C-324

Consejo de Estudios de Postgrado, ULA

CONTENIDO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

P A R T E I

I - EL CAFE EN UN CONTEXTO ECOLOGICO, SOCIOECONOMICO E HISTORICO

1. INTRODUCCION	1
2. CARACTERISTICAS DE LA ESPECIE	5
2.1. La especie	5
2.2. Factores ambientales	6
2.3. Estructura aérea	7
2.4. Estructura subterránea	10
2.5. Transpiración	11
2.6. Reproducción	13
2.7. Requerimientos nutricionales	14
3. EL SOMBREADO	17
4. ORIGEN E HISTORIA	22
4.1. Origen e historia	22
4.2. El café como cultivo comercial en Venezuela	25
5. FORMAS DE CULTIVO	29
5.1. Distintas formas	29
5.2. Cultivos mixtos	30
5.3. Respuestas a problemas de erosión	31

II - SOBRE EL BALANCE HIDRICO A NIVEL DE ECOSISTEMAS Y EL ESTUDIO DE PROCESOS EROSIVOS

1. BALANCE HIDRICO	34
1.1. Intercepción y precipitación efectiva	36
1.2. Drenaje superficial	42
1.3. Drenaje oblicuo	47
1.4. Drenaje profundo	49
1.5. Evapotranspiración	51
2. EROSION	58
2.1. Enfoques, conceptos	58
2.2. Erosión hidrica	66
2.3. Métodos de estudio	75

P A R T E I I

III - FUNDAMENTACION Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

1. FUNDAMENTACION	82
2. OBJETIVOS	84
2.1. Objetivo general	84
2.2. Objetivos especificos	85

IV - LOS CAFETALES BAJO ESTUDIO

1. LA SELECCION DE LOS CAFETALES	88
2. CARACTERISTICAS GENERALES Y FISICAS	91
2.1. Suelo	91
2.2. Clima	93
3. ESTRUCTURA Y DISTRIBUCION DE LA VEGETACION	96
3.1. Cafetal de sol	96
3.2. Cafetal de sombra	100
4. FENOLOGIA	103
5. CALENDARIO AGRICOLA	106

V - METODOLOGIA	111
1. LA FABRICACION E INSTALACION DE LOS DISPOSITIVOS PARA MEDIDAS DE CAMPO	114
1.1. MEDIDAS DE ENTRADAS DE AGUA Y NUTRIENTES AL SISTEMA:	114
1.1.1. Los pluviómetros: medidas de precipitación efectiva	1114
1.1.2. Cobertura vegetal	121
1.1.3. Los colectores de tronco: medida del agua que escurre por los troncos	1122
1.1.4. Los colectores de hojarasca: medida de la caída de hojarasca	124
1.2. MEDIDAS DE SALIDAS DE AGUA, NUTRIENTES Y FRACCION MINERAL DEL SUELO, DEL SISTEMA	125
1.2.1. Drenaje superficial	125
1.2.2. Drenaje oblicuo	129
2. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO	131
3. CARACTERISTICAS CLIMATICAS	132
3.1. Precipitación	132
3.2. Evapotranspiración	134
4. LA HOJARASCA SOBRE EL SUELO	134
5. ANALISIS QUIMICO	136
6. LA TOMA DE DATOS	137
VI - RESULTADOS Y DISCUSION	139
1. LA PRECIPITACION TOTAL	139
2. PRECIPITACION EFECTIVA E INTERCEPCION	151
3. ESCURRIMIENTO POR LOS TRONCOS	161
4. ESCORRENTIA O DRENAJE SUPERFICIAL	166

5. CONSIDERACIONES SOBRE EL BALANCE HIDRICO	173
5.1. El agua en el suelo	176
5.2. Drenaje oblicuo	181
5.3. Evapotranspiración	183
5.4. Sobre el balance hidrico	189
6. INCORPORACION Y ARRASTRE DE HOJARASCA	194
6.1. La caída de hojarasca	194
6.2. El arrastre por drenaje superficial ...	204
7. VARIABILIDAD ESPACIAL	211
7.1. Efecto de los microambientes en la precipitación efectiva parcial	215
7.2. Efecto de los microambientes en la caída de hojarasca	219
8. NUTRIENTES	223
8.1. Las entradas por precipitación	224
8.2. El pluviolavado	231
8.3. Las pérdidas de solutos por escorrentia	237
9. EROSION	244
9.1. El ritmo anual	244
9.2. Magnitud de la erosión	252
VII - CONCLUSIONES	256
VIII- BIBLIOGRAFIA CITADA	265
VIV - ANEXOS	
ANEXO 1 : Entradas y salidas de agua	276
ANEXO 2 : Erosividad de lluvias >10mm	280
ANEXO 3 : Agua en el suelo	282
ANEXO 4 : Coeficiente de Variación pluviómetros ..	285
ANEXO 5 : Hojarasca caída	286
ANEXO 6 : Hojarasca arrastrada	287
ANEXO 7 : Fracción mineral removida por erosión ..	288
ANEXO 8 : Contenido de nutrientes en aguas	289
DESPLIEGABLE : lista de muestreos con fechas respectivas	

RESUMEN

El objetivo general de este trabajo es estudiar las consecuencias ecológicas de las dos principales formas de cultivar el café. La primera forma, llamada tradicional, es aquella en la que los cafetos de la variedad *Coffea arabica* var. *arabica* se encuentran sombreados por árboles más altos que generalmente son especies de la selva original, aunque se puede utilizar otros árboles frutales que aumentan el número de productos que se obtienen de un mismo terreno. Estos cafetales conservan parte de la fisonomía de la vegetación forestal, con gran cobertura y el uso de insumos como fertilizantes no es obligatorio.

En los últimos 15 años se han ido haciendo cada vez más importantes los cafetales con la variedad *Coffea arabica* var. *bourbon* y sus derivados. Estos requieren plena exposición solar, por lo que los cafetos se cultivan solos, separados dejando mucho suelo desnudo. En ellos la fertilización es indispensable. Su principal ventaja es económica: producen tres veces más que la variedad de sombra y, aunque es menos aromático, se paga igual en el mercado interno nacional.

Ambas formas de cultivo se realizan en las laderas de vertientes húmedas, entre 700 y 1800 m, ya que las pocas terrazas de nuestros ríos son utilizadas preferentemente para cultivos anuales. Una de nuestras preocupaciones es el efecto que sobre estas laderas puedan tener distintas formas de cultivo.

El objetivo específico de este trabajo ha sido presentar y analizar primeros resultados sobre el estudio de estos agroecosistemas en cuanto a: 1) balance hídrico, 2) dinámica de hojarasca, 3) balance de nutrientes y 4) procesos erosivos.

El trabajo de campo se ha desarrollado en la zona de Canaguá, en Los Pueblos del Sur del Estado Mérida, en dos cafetales (de sol y de sombra) que son contiguos, con la misma cota (1730 m), sobre el mismo sustrato y con la misma pendiente y orientación. Tienen un promedio de temperatura anual de 18°C y 1600 mm de precipitación. Allí hemos instalado una serie de dispositivos de campo que comprenden pluviómetros, pluviógrafo, termohigrógrafos, colectores de tronco, parcelas de erosión, parcelas de drenaje oblicuo. Periódicamente, medimos el agua registrada en cada caso, así como la hojarasca y fracción mineral arrastradas en las parcelas de erosión, tomamos muestras de agua, hojarasca y suelo para medidas de laboratorio.

Los resultados muestran que la precipitación total permite dividir el año en dos periodos: seco (diciembre a abril) y lluvioso (mayo a noviembre). La precipitación efectiva (suma del goteo y del escurrimiento por los troncos) es siempre mayor en el cafetal de sol; en el balance anual la pp efectiva en el cafetal de sol es 87% de la pp total mientras para el de sombra es 79%. Esto significa que la interceptación en el cafetal de sombra es

mucho mayor, con 21% de la pp total (valor que está dentro de lo observado en sistemas forestales tropicales).

Así que la vegetación modifica el monto de agua que llega al suelo, pero además modifica su distribución: mucha en el borde de las copas de los cafetos, menos entre líneas de cafetos y el mínimo debajo de ellos.

Del agua que llega al suelo, parte drena superficialmente: es la escorrentía, cuya marcha anual muestra valores un poco mayores en el cafetal de sol. Pero si los comparamos con el agua que realmente llega (pp efectiva) vemos que la proporción escurrida es mayor en el cafetal de sombra, salvo en el período seco: esto parece consecuencia del papel de la hojarasca en la superficie del suelo la cual es mayor en el cafetal de sombra y está embebida de agua durante la época lluviosa drenando parte de su excedente, pero durante el período seco retiene la poca agua que le llega (cosa que no sucede en el cafetal de sol) y además limita las pérdidas del suelo por evaporación.

En el trabajo se detalla la marcha anual de todos los compartimientos del balance hídrico. En el balance anual vemos que las mayores diferencias entre los cafetales se deben a la retención de agua por el follaje (que es mayor en el cafetal de sombra), mientras el drenaje superficial es semejante si consideramos todo el año pero es muy diferente en distintas épocas: durante el período seco hay una mayor retención de agua en el cafetal de sombra por la hojarasca, mientras en el lluvioso se escurre una mayor cantidad que en el de sol. Con el agua dentro del suelo ocurre algo semejante: el cafetal de sombra tiene una retención mayor en el período seco pero drena más agua en el período lluvioso.

Los cálculos de drenaje profundo y evapotranspiración se han realizado por la aplicación de la fórmula empírica de García & López, utilizando los registros mensuales de temperatura y humedad relativa en los dos cafetales. Nuevamente el total anual da valores semejantes pero con grandes diferencias en los períodos seco y lluvioso, donde el drenaje en el cafetal de sombra es mucho menor en la época seca pero mayor en la lluviosa. En el cafetal de sombra buena parte de la evapotranspiración es por intercepción, llegando al 50%, mientras en el cafetal de sol la intercepción sólo explica el 30% de la evapotranspiración de modo que allí la evaporación del suelo y la transpiración representan el 70% del agua que se pierde por esa vía.

Hemos estudiado parte de la dinámica de la hojarasca: su caída, su arrastre superficial. La caída está relacionada con las fenofases de las principales especies del cafetal, las cuales hemos evaluado analizando su fenología. En efecto, la mayor concentración de hojarasca caída se ubica en los meses secos cuando tanto los cafetos como los árboles de sombra tienen su máxima pérdida de hojas; sin embargo la acumulación en superficie no es paralela a la caída. La distribución espacial depende de los microambientes de cada cafetal y es muy diferente en cada

caso. Los primeros cálculos de la constante de descomposición (K) dan valores de 0,70 para el cafetal de sombra y 1,49 para el de sol, lo cual significa que en éste último la descomposición es mucho más acelerada.

Uno de los aspectos importantes en las diferencias entre estos cafetales es como resulta afectado el balance de nutrientes. En esta primera etapa hemos considerado los aportes por pp total, el lavado foliar, escurrimiento por los troncos y las pérdidas por drenaje superficial. Sólo hemos estudiado los cuatro principales cationes: potasio, calcio, magnesio y sodio. En general, los resultados revelan que los aportes al suelo por pluviolavado son, en orden de importancia: K, Ca, Mg, mientras el Na no es lavado.

El comportamiento de los cationes en el drenaje superficial es indicativo de que el paso de ese agua por la hojarasca es tan rápido que no tiene tiempo de lavarla, a excepción del K, ya que están en las mismas proporciones que en el agua de precipitación efectiva.

Finalmente, el análisis de pérdidas de fracción mineral por erosión revelan que ésta es mayor en el cafetal de sol. Al relacionar la marcha anual de estas pérdidas con parámetros como monto de agua de arrastre (drenaje superficial) y erosividad de las lluvias (por el índice AIm de Lal) se observa que no hay correspondencia. Por el contrario, se observa una alta correlación entre los principales picos de pérdida de material y los momentos de mayor movimiento de personas en el cafetal por actividades agrícolas.

PARTE I

I - EL CAFE EN UN CONTEXTO ECOLOGICO, SOCIOECONOMICO E HISTORICO

1 - INTRODUCCION

Una de las controversias más violentas sobre el cultivo del café ha sido llevada por la puesta sobre la mesa de dos enfoques distintos: 1) uno que sostiene que la mejor forma de cultivo es aquella que intenta reproducir controladamente las condiciones ambientales originales de la especie, es decir los cafetos como plantas de sotobosque con árboles sombreantes, y 2) otro que sostiene que la aparición de nuevas variedades resistentes a la insolación continua y que son mucho más productivas abre una nueva era en la economía cafetalera que debe reemplazar la anterior (Purseglove, 1974; Coste, 1969; Haarer, 1984).

Los defensores de una y otra posición no llegan a ponerse de acuerdo sobre la base de que, lo que cada uno defiende, refleja intereses contrastantes: los partidarios del cafetal de sombra han argumentado en favor del mínimo deterioro de las condiciones ambientales del área, en especial los procesos erosivos, mientras los partidarios del cafetal de sol se apoyan en el innegable aumento de productividad de esas variedades que redundan en un beneficio económico inmediato. La mayoría conciliadora, viendo razón en ambos planteamientos ha estudiado la forma de obtener los dos beneficios: una mayor productividad con control de los factores que degradan el ambiente. Es así como se han propuesto una cantidad de técnicas para disminuir la erosión en cafetales

de sol.

Pero en la mayoría de esas discusiones, en especial las referidas en los trabajos más clásicos, sólo se manejan los criterios económico-agronómicos contra los criterios de degradación ambiental y raramente se los combina con las condiciones de las comunidades rurales. La realidad socioeconómica y política de las comunidades de caficultores en diferentes regiones del mundo es muy distinta y el considerar esas condiciones abre una dimensión diferente al problema planteado. Sin duda no es lo mismo pensar en términos de grandes plantaciones con un monocultivo que pensar en microparcelas donde la indigencia fuerza a una sobreexplotación del terreno, ni tampoco es lo mismo pensar en pequeños productores autosuficientes.

En Los Andes venezolanos, y en especial en los Pueblos del Sur de Mérida, las comunidades de caficultores están formadas por pequeños propietarios que desde el siglo pasado se han mantenido bien gracias a dos cosas: por un lado la comercialización de un producto que por momentos alcanza altos precios y permite excedentes monetarios en la población y por el otro lado a que ese producto no se ha tratado como un monocultivo sino que por el contrario su forma de manejo ha permitido e incluso facilitado una diversificación (Monasterio & Ataroff, 1986; Ataroff & Monasterio, 1987). En efecto, los cafetales de sombra son explotados desde el nivel de los árboles sombreantes que con frecuencia son frutales, hasta la hojarasca en la cual encuentran

su alimento animales domésticos (sobre todo las aves de corral), pasando por la obtención de tubérculos tipo malangá en la orilla de las quebradas menores.

En estos casos, la disminución "per se" de los procesos erosivos no es la única ventaja de los cafetales de sombra, ya que: 1) ese control se hace a mínimo costo, en realidad no hay que construir nada, lo cual es importante para pequeños productores y 2) la diversidad de productos que pueden lograrse en una misma parcela permite una autosuficiencia que garantiza el mantenimiento en momentos de crisis.

Los problemas de índole ecológica y socioeconómica están muy ligados y es difícil interpretar la trascendencia de uno si no se tiene en cuenta el otro. La agroecología no es sólo un conjunto de principios y metodologías científicas sino una forma de pensar (Golley & Ryszkowski, 1988). Los estudios de esta naturaleza requieren del concurso de varias disciplinas y debe vérselas a todas con igual interés evitando mantener o respetar los límites entre ellas. Además, los estudios en agroecosistemas deben ubicarse con claridad en las dimensiones tiempo-espacio porque las consecuencias ecológicas derivadas de cambios en políticas agrícolas varían no sólo de acuerdo al espacio afectado por éstas sino por el tiempo que duran (Baudry et al, 1988).

Así que no es conveniente tratar aisladamente los problemas ecológicos y socioeconómicos a nivel de los objetivos generales de los proyectos que pretenden analizar las consecuencias de este cultivo, y mucho menos a nivel de las discusiones finales. Sin

embargo, el trabajo concreto en cada etapa de los proyectos puede y debe centrarse en alguna línea en particular, sin que esto signifique que se pierde la idea de hacia donde va el trabajo global.

Desde el punto de vista ecológico, los agroecosistemas cafetaleros se pueden enfocar hacia el mejoramiento de las condiciones de desarrollo, mantenimiento y producción del café o bien hacia la estabilidad del sistema en el tiempo, porque al igual que Toledo et al (1987), pensamos que uno de los aportes más importantes de la ecología es el analizar y comprender los procesos en los sistemas naturales de forma de crear la base de conocimientos necesaria para manejar esos ambientes de modo de hacerlos productivos sin conducirlos a la degradación irreversible.

Tanto en el caso del mantenimiento de los cafetos como de la estabilidad del agroecosistema, las condiciones hídricas y de nutrientes son los puntos claves a tratar. En el segundo se hace además importante el estado de los procesos erosivos. Estos son los temas a los que pensamos hacer una primera aproximación.

2 - CARACTERISTICAS DE LA ESPECIE

Al hablar de las características de la especie nos referiremos sólo a aquellas que puedan ser relevantes para el estudio que llevamos a cabo. Es decir, factores físicos del ambiente como sus óptimos y extremos tolerables de temperatura, humedad relativa, precipitación, suelo, etc. que pueden relacionarse con distintos compartimientos del balance hídrico, así como también la estructura aérea y subterránea de la planta y características fisiológicas como transpiración. La reproducción es, lógicamente, importante en una especie de la que se comercializa las semillas y las características fenológicas en general determinan las actividades agrícolas dentro del cafetal. Finalmente, es necesario tener idea de los requerimientos de nutrientes de modo de entender la importancia diferencial que tiene para este cultivo la incorporación o pérdida de algunos elementos.

2.1. La especie

Coffea arabica es una de las principales especies comerciales del genero *Coffea* (Rubiaceae) del cual se han descrito entre 25 y 100 especies dependiendo de los autores. El número más probable es cercano a los 60, de las cuales más de la mitad son originarias de Africa tropical y el resto de Madagascar, Mauricio, Reunión y del sur-este de Asia (Pursegllove, 1974).

La variedad originalmente traída a América fue *Coffea arabica* L. var. *arabica* (sin. var. *typica* Cramer) y que continúa siendo una de las variedades más importantes en este continente. *C. arabica* L. var. *bourbon* (B.Rodr.) Choussy, otra de las variedades importantes, adquirió su nombre de la isla Bourbon (actualmente isla Reunión) donde fue llevado por los franceses en 1718. El popular "Caturra" es el mutante dominante de la Var. *bourbon* y el "Mundo Nuevo" se originó en Brazil de cruces naturales entre las variedades *arabica* y *bourbon* (Purseglove, 1974; Haarer, 1984).

2.2. Factores ambientales:

En su ambiente original, el café se encuentra entre 1.300 y 1.800 m, entre 6° a 9° N, con una estación seca de cuatro a cinco meses de duración y un total de precipitaciones de entre 1.500 a 1.800 mm. La temperatura media está entre 20° y 25 °C con mínimas de 4° a 5 °C y máximas ente 30° y 31 °C (Coste, 1969; Purseglove, 1974; Haarer, 1984).

La especie *C. arabica* soporta mejor que las otras los cambios de temperatura: puede sobrevivir, aunque con severos trastornos fisiológicos, a temperaturas entre 0 y -2°C y algo superiores a 30 °C (Coste, 1969). Ukers (1935, cita de Haarer, 1984) dice que las temperaturas registradas en los países productores son de 12,7°C como mínimas y 26,6°C como máximo, con media de 21,1°, mientras que el grueso de las regiones cafetaleras venezolanas registran 15°C como mínima y 20°C como

máxima, aunque en los extremos hay máximas de 32,2°C y mínimas de 7,7°C (De Dueiros, 1944 cita de Harrer, 1984).

Esta especie no tolera precipitaciones muy altas (superiores a 2.000 mm) y por debajo de los 800 mm su producción es aleatoria. La repartición anual de las lluvias es de gran importancia para todas las etapas del proceso reproductivo: las condiciones óptimas son de un periodo lluvioso largo con precipitaciones bien repartidas y un periodo seco de por lo menos dos meses (ver punto 2.6.) (Coste, 1969; Haarer, 1984).

La humedad relativa, el viento y la insolación son factores importantes desde el punto de vista fisiológico debido fundamentalmente a su efecto en la transpiración.

2.3. Estructura aérea:

El cafeto adulto tiene una rama primaria, lignificada e improductiva (el tronco), de la que se originan ramas plagiotropas secundarias, también lignificadas y que cuando tienen entre uno y tres años producen flores y brotes vegetativos, y finalmente existen los brotes nuevos (del año en curso) todavía herbáceos y que difícilmente florecen (Coste, 1969) (Figuras I-1 e I-2). Haarer (1984) señala haber observado que cuando las condiciones ambientales son muy favorables son las ramas laterales más viejas las que florecen y así las hojas que están ubicadas en las ramas tiernas crecen frondosas, mientras que en condiciones desfavorables la floración ocurre en las ramas jóvenes en detrimento de las hojas nuevas las cuales comienzan a

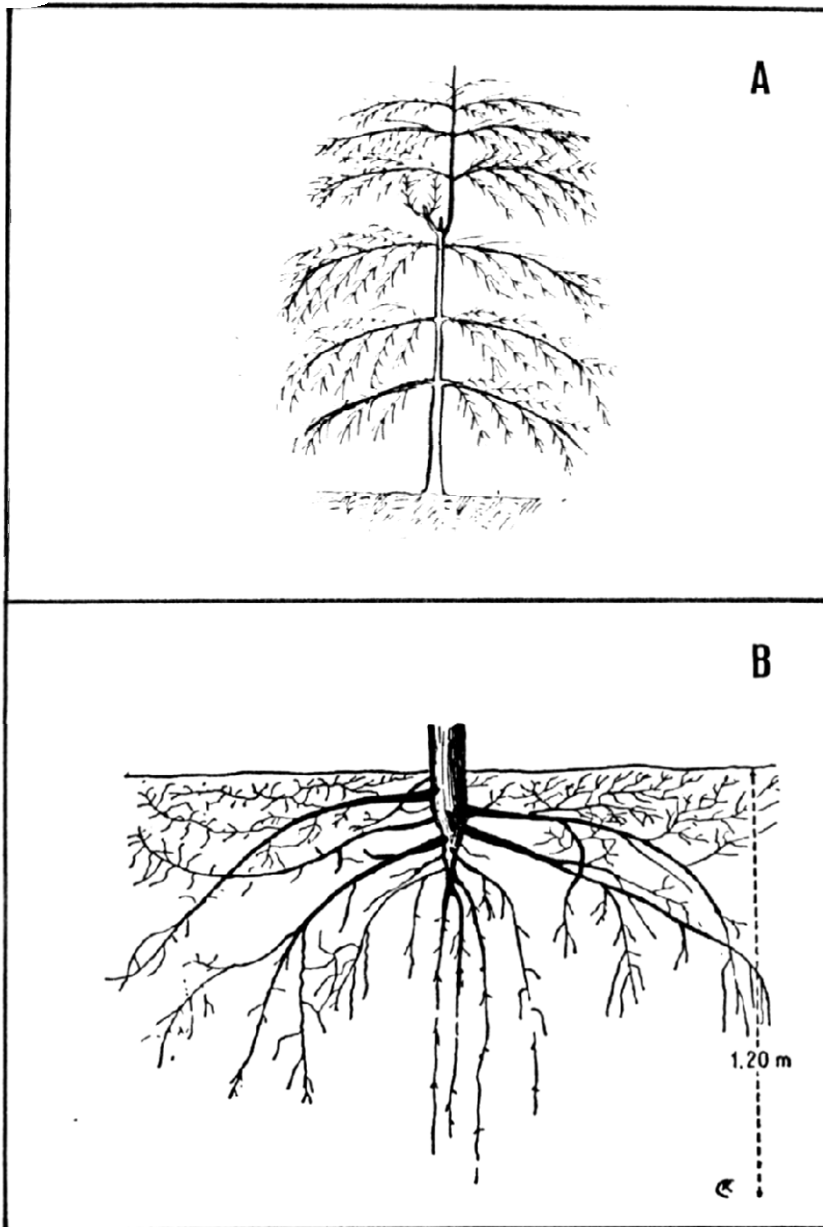


FIGURA 1-1 : Coffea arabica A) disposición de las ramas
B) sistema radical
Tomado de Henao (1982) y Coste (1969)

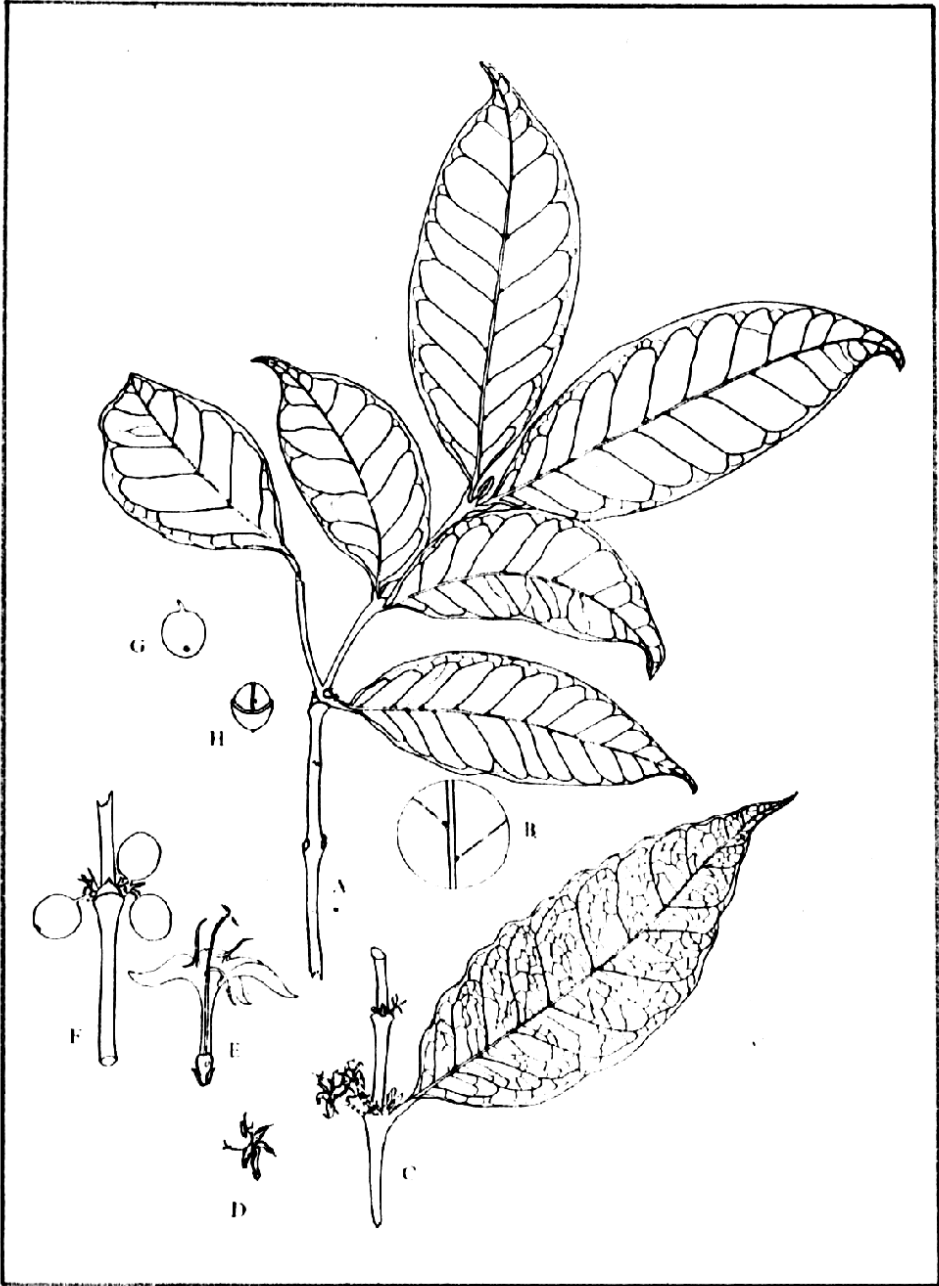


FIGURA I-2: *Coffea arabica*, A) extremo de rama plagiotropo
 B) detalle del envés de una hoja
 C) detalle del tallo con flores
 D) flor
 E) sección de una flor
 F) nudo con frutos
 G) fruto
 H) fruto sin parte del mesocarpo

Tomado de Purseglove, 1974

senescer y varias fenofases reproductivas comienzan a sobreponerse en las mismas ramas.

La superficie foliar para *C. arabica* está entre 22 y 45 m² (Franco, 1963 cita de Coste, 1969).

Coste (1969) da datos para *C. arabica* de que la caída de hojas se extiende por toda la época de lluvias en Kenia, cuando las hojas tiene unos siete a ocho meses. Hay caídas pequeñas durante todo el año.

La aparición de la senescencia depende de muchos factores externos, pero un cafetal bien cuidado sobrepasa ampliamente los 20 años en producción (Coste, 1969). Durante 1984, encontramos en Aricaque (Pueblos del Sur de Mérida) cafetales en producción de más de cincuenta años y de uno de ellos se no dijo que tenía unos 100 años (sembrado por los abuelos).

2.4. Estructura subterránea:

El sistema radical del cafeto (Figura I-1B) se compone de una raíz principal pivotante corta de 30 a 50 cm (aunque en suelos profundos puede alcanzar 100 cm), cuya función principal es de sostén. De ella se originan raíces laterales muy largas que se hunden tanto más profundamente cuanto más permeable sea el suelo y cuya principal función es la absorción de agua (en ambientes con lluvias todo el año estas raíces se mantienen en superficie). De ellas nacen numerosas raicillas que se ubican en un plano horizontal y se concentran en las capas superficiales

del suelo, las más ricas, siendo su principal papel la nutrición mineral (Coste, 1969; Haarer, 1984). Según Henao (1982) la concentración de raíces absorbentes en el horizonte superficial es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica en descomposición y a la presencia de oxígeno, más que a las características físicas del suelo. El sistema radical ocupa un área que circunda el cafeto de 2 a 4 m de diámetro.

También según Henao (1982) la textura del suelo y la topografía son determinantes en el desarrollo del sistema radical, afectando desde su forma hasta su tamaño y extensión. En un suelo medianamente profundo y bien estructurado, el 90% de las raíces se ubica entre 0 y 30 cm de profundidad y las absorbentes se distribuyen en mayor densidad hacia la zona de proyección de las ramas primarias (plagiotrópicas) (Henao, 1984; Coste, 1969). Las raíces no toleran la napa de agua, donde ella está cerca de la superficies, en suelos mal drenados, las raíces se ubican en muy pocos cm superficiales (Furseglove, 1974).

Parece ampliamente probado que esta especie prefiere suelos ácidos, entre 4 y 5 de pH (Coste, 1969; Haarer, 1984).

Igualmente, la amputación de raicillas superficiales no afecta al cafeto, pero si la destrucción de raíces gruesas aunque sean laterales (Coste, 1969).

2.5. Transpiración

La transpiración es una de las características fisiológicas menos estudiadas. Se ha calculado para *C. arabica* en los

siguientes valores:

LUGAR	TIPO	mm	FUENTE
Brasil	sol	593	Franco, 1963
"	sombra con <i>Inga edulis</i>	1120	Franco & Inforzato, 1951
México	sol	1327	Jimenez & Goldberg, 1982
"	sombra con <i>Inga leptoloba</i>	703	" "
"	mixto	1052	" "
Kenia		840	Pereira et al, 1963

mixto: varias especies de árboles sombreantes

Los valores de transpiración naturalmente dependen de la densidad de las poblaciones de las especies implicadas (cafetos, árboles, malezas, etc.) y de las condiciones ambientales, pero muestran que la transpiración puede comprender entre la mitad y tres cuartos de la precipitación total (considerando que una media de óptimos de precipitación es de 1700 mm).

Es interesante notar que si bien el cierre estomático ocurre bajo déficit hídrico no tan fuerte, de todos modos la transpiración sigue a través de la cutícula hasta deshidratar completamente la hoja (Coste, 1969). Nutman (1941 cita de Jimenez & Goldbeg 1982) encontró que la transpiración y la fotosíntesis incrementan proporcionalmente con la intensidad lumínica, hasta cierto umbral alto de intensidad después del cual la transpiración disminuye probablemente por cierre estomático parcial.

2.6. Reproducción:

Las primeras flores aparecen hacia el tercer año de la planta, pero la floración no alcanza su plenitud hasta el cuarto o quinto año (Coste, 1969). Las flores se generan del desarrollo de yemas de axilas foliares de las ramas plagiotropas, pero en general de aquellas que ya tienen uno, dos o tres años (ver estructura aérea). Las yemas florales se desarrollan hasta una etapa avanzada y así permanecen hasta la ocurrencia de una lluvia que sobrepase el "umbral pluviifloral", definido por Porteres como *"espesor de la lámina de agua recibida por el suelo que es capaz de crear y mantener el estado de turgencia necesario y suficiente para desencadenar la floración"*, la floración parece favorecerse si previo a esa lluvia copiosa ocurre un pequeño período seco (Coste, 1969; Purseglove, 1974). Para Haarer (1984) ese período seco debe interpretarse de la siguiente forma: la humedad superficial del suelo debe disminuir por un pequeño lapso suficiente para que *"suba el contenido de nitrógeno... y para que se retarde el crecimiento, se endurezca la madera y se inicie la floración"*, durante ese lapso las raicillas superficiales mueren lo cual no afecta el balance hídrico de la planta que dispone para la absorción de agua de las raíces secundarias gruesas (ver estructura subterránea).

Coste (1969) señala que F.P. Ferwerda calculó que un cafeto adulto recibe en 8 horas y en un radio de 8 metros 2.500.000,00 granos de polen cantidad más que suficiente para asegurar la fecundación de todas sus flores que son entre 20.000 y 30.000.

Esta especie es la única del género *Coffea* en ser autógama. Es autofértil en un 90%, de modo que parte de sus flores pueden ser fecundadas antes de abrir. Los agentes polinizadores son en primer lugar el viento y en segundo lugar insectos. Las fuertes lluvias y vientos violentos pueden disminuir mucho el % de fecundación.

El desarrollo de los frutos comienza inmediatamente después de la fecundación y en el caso de *C. arabica* el tiempo entre floración y maduración de los frutos es de 6 a 8 meses. La caída de frutos jóvenes es importante en los primeros meses y se ha atribuido a fecundación defectuosa, ataque por insectos o sequía prolongada. Una menor caída después de los primeros meses se atribuye más bien a carencias nutricionales (Coste, 1969).

2.7. Requerimientos nutricionales

Nos referiremos en esta parte a las necesidades y consecuencias del déficit de los macronutrientes principales: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

Nitrógeno:

El nitrógeno es el elemento que se necesita en mayor cantidad para lograr un desarrollo normal, y además tiene una especial influencia en la formación de yemas florales (Henao, 1982).

Las deficiencias en este elemento producen marchitez y caída de las hojas y muerte de la punta no lignificada de las ramas

plagiotropas, precisamente las de crecimiento activo. Este efecto es mucho más grave en variedades cultivadas a pleno sol (Henao, 1982; Purseglove, 1974).

La aplicación de nitrógeno como abono químico se recomienda en dos momentos al año: al finalizar la estación seca o comenzar la floración y antes de la cosecha cuando los frutos están madurando (Haarer, 1984).

Fósforo:

El café no tiene grandes requerimientos de fósforo por lo que los casos de déficit son poco comunes. Los mayores síntomas los presentan las hojas más viejas que se tornan amarillentas y rojizas, pero no tiene graves repercusiones a nivel de toda la planta (Henao, 1982; Purseglove, 1974). Sin embargo, el aumento en contenido de fósforo mejora el aprovechamiento de nitrógeno y magnesio (Haarer, 1984).

Potasio:

Al igual que el nitrógeno, el potasio es requerido en grandes cantidades por los cafetos especialmente en la etapa de maduración de los frutos. Aparte del grano, en donde la concentración de este elemento es de un 20%, el resto del fruto presenta concentraciones entre 75 y 80%; de allí que en algunos cultivos se utilice esas cáscaras como abono.

Por su papel en la maduración de los frutos, las carencias de este elemento provocan graves problemas a nivel reproductivo que comprenden un descontrol del período de formación (se altera

el ritmo fenológico), formas anormales del fruto y momificación del mismo quedando adherido a la planta. Aparte de que acelera la marchitez de las hojas maduras, las cuales una vez que han perdido el potasio que contenían por translocación hacia los frutos, se desprenden de la planta y si las deficiencias del elemento no se corrigen para el inmediato período de producción de hojas nuevas el siguiente ciclo reproductivo corre el peligro de perderse (Henao, 1982).

Calcio:

Al igual que el fósforo, el calcio no es requerido en forma abundante por los cafetos. En consecuencia, los síntomas de su déficit son raramente vistos en el campo. Sólo carencias extremas producen malformación de las hojas y clorosis, y eventualmente necrosis de las mismas (Henao, 1982; Purseglove 1974). Se ha determinado que dosis excesivas de calcio pueden perjudicar la absorción de potasio, pero también neutralizan la toxicidad de otros elementos (Haarer, 1984).

Magnesio:

Es un elemento importante para los cafetos. Su deficiencia produce clorosis severa, suspensión de las actividades reproductivas y un especie de letargo del cual no es fácil la recuperación. Con frecuencia el déficit se produce no tanto por una carencia ambiental sino por la interferencia por parte del potasio cuando éste es aplicado en cantidades excesivas (Henao, 1982; Purseglove, 1974).

3 - EL SOMBREADO

Cultivar el café bajo sombra es una forma que se origina del deseo de crear condiciones semejantes a las naturales para esta especie. Este hecho es muy interesante porque si bien originalmente se planteó con criterio comercial pensando en aumentar la producción mejorando las condiciones de vida de los individuos, a la larga ha resultado que es uno de los pocos cultivos no forestales que mantienen "algo" de la vegetación original: algunas especies muy escogidas, parte del dosel, parte del ambiente de sotobosque como mantillo, humedad relativa más alta, temperaturas más estables, etc. Todo esto ha contribuido a asignarle el calificativo de "cultivo conservacionista". Sin embargo, esa posición ha sido ampliamente discutida y está claro que sólo el estudio riguroso de sus consecuencias ecológicas y socioeconómicas pueden arrojar luz sobre esta controversia.

De los estudios publicados podemos resumir algunas características de los cafetales bajo sombra:

Numerosos autores (Nutman, 1937; Franco 1963; Alvin 1960; Sylvain 1948; citados por Haarer, 1984, Coste, 1969, Browning, 1977) han demostrado que la capacidad fotosintética en cafetos es mayor a luz difusa que a plena luz, situación que puede darse por nubosidad o sombreado correcto. Nutman (1937b) piensa que para un máximo de asimilación se requiere un tercio de la insolación total del mediodía. Naturalmente que esto debe variar de acuerdo a variedades y cultivares, sobre todo considerando que para algunas variedades de sol las hojas auto sombreadas son mucho más

numerosas que las que están expuestas y las cubren. Sin embargo, Tió (1962) mostró como la *var. bourbon*, que puede crecer a pleno sol, da valores de tasa fotosintética máxima que corresponden a la media para plantas tropicales de sombra.

El sombreado ejerce una acción moderadora sobre la inducción floral y fructificación, lo cual alarga la vida productiva de la planta, evita el agotamiento prematuro y la marchitez (Coste, 1969; Purseglove, 1974; Haarer, 1984). Este es un punto interesante, pues muchos estudiosos de este cultivo refiriéndose no sólo a sus investigaciones sino a las experiencias de caficultores de distintos países no consideran que la disminución en producción de cultivos de sombra respecto a los de sol sea negativo, ni que signifique una pérdida para el productor; por el contrario, lo atenuado de los procesos vegetativos y reproductivos es visto como una de las ventajas del sombreado alegando no sólo la mayor longevidad de la plantación sino que requiere menos cuidados (esto es menos insumos en general) y puede abandonarse por un número de años sin que el cultivo se pierda; en Kilimanjaro todas las plantaciones fueron abandonadas durante la primera guerra mundial entre 1917 y 1921, después de lo cual no hubo ninguna dificultad en ponerlas a producir otra vez, según Haarer (1984) esto no es posible en cafetales de sol. Así, él propone directamente el abandono de los cafetales de sombra en periodos de baja de precios para ser retomados cuando la situación de mercado mejore y mientras tanto el agricultor puede dedicarse a otra actividad.

De la misma manera, el sombreado disminuye la evaporación y transpiración permitiendo soportar mejor los periodos de sequía. Haarer (1984) señala que *"aunque hay transpiración en los árboles de sombra, las pérdidas se compensan ampliamente por una reducción en la transpiración de los cafetos que están debajo y en la evaporación del suelo"*.

La temperatura menos elevada en la superficie del suelo evita una descomposición demasiado rápida de la hojarasca. Evita también una desecación rápida en superficie que permite a las raicillas mantener constante su actividad. Según Haarer (1984), *"las temperaturas superiores a las óptimas para el café árabe originan un rápido crecimiento, fructificación temprana, sobrecarga en las ramas jóvenes, agotamiento prematuro y marchitez"*.

Haarer (1984) advierte sobre las consecuencias de erosión que tiene el no prever la velocidad de crecimiento de las plantas sombreadas en terrenos que han sido completamente limpiados y lo mismo es válido si no se piensa plantar esos árboles nunca. Cita los experimentos de Birggs (1934) en Uganda y Pereira & Jones (1950) sobre como en tres años los cambios producidos por erosión y "combustión anormal de materia orgánica" afectaron altamente el cultivo.

La existencia de un dosel de árboles también atenúa la velocidad del viento y tiene una acción depresora del crecimiento de muchas malezas (Coste, 1969; Purseglove, 1974; Jimenez & Martinez, 1979; Haarer, 1984). La caída de hojarasca crea un

colchón en la superficie del suelo que mejora el mantenimiento de humedad y suministra nutrientes extras que el café puede aprovechar sobre todo si se trata de hojas de árboles con raíces profundas que extraen nutrientes de niveles que el cafeto no alcanza; aparte, si los árboles son leguminosas pueden tener un papel extra en la fijación de nitrógeno (Purseglove, 1974; Aranguren, 1979). Purseglove (1974) indica como ventaja la siembra de árboles deciduos en áreas con marcada estacionalidad hídrica pues la pérdida masiva de hojas ayuda a retener la humedad del suelo y disminuye la transpiración de esos árboles.

Naturalmente, la existencia de árboles provee productos extras de las parcelas de café como madera y diversos frutos, que colaboran en el mantenimiento del núcleo familiar.

Sin embargo, Coste (1969) señala que el mantenimiento de los árboles es un trabajo extra de los caficultores y el conservar una humedad relativa mayor favorece el desarrollo de algunas enfermedades. Además de la posible competencia por nutrientes y agua si las especies sombreantes no son bien seleccionadas.

Es importante notar que los árboles sombreantes no son necesarios en ambientes con nubosidad (Coste, 1969; Haarer, 1984), cosa demostrada en muchos cultivos en Africa y que podemos observar también en los cafetales andinos de altura.

Según Purseglove (1974), bajo condiciones óptimas de suelo y clima, con fertilizantes adecuados, se pueden obtener muy buenos resultados (alta productividad) sin sombra. Pero si el suelo no es favorable, las precipitaciones son excesivas, las temperaturas

son demasiado altas o demasiado bajas, el período de alta insolación es demasiado prolongado, entonces el sombreado es indispensable para obtener una producción sostenida y regular.

La utilización del sombreado por su efecto moderador sobre el balance hídrico de un agroecosistema no es exclusivo del café: en Senegal la producción de ajonjolí constituía en la década de los sesenta el 80% de las exportaciones, cultivo que era realizado en el estrato herbáceo de las sabanas arboladas (10 a 30 árboles por ha), como un modo de incrementar los cultivos y de mecanizarlos se comenzó un proceso de tumba de árboles; una serie de estudios agroclimatológicos mostraron que esa nueva forma de cultivo no traería a la larga ningún beneficio sino todo lo contrario por la disminución de rendimientos al aumentar la evapotranspiración, la disminución de calidad del producto (contenido de lípidos en semillas) por cosecha temprana tratando de evitar la extrema sequía, así como los riesgos de tener que sembrar dos veces por aleatoriedad de las lluvias al comienzo de la época lluviosa. Todo esto aparte del importante efecto socioeconómico que debe tener para las comunidades locales el perder ese estrato arbóreo que contribuía en forma natural a la dinámica del nitrógeno (más de 10 especies de leguminosas), al suministro extra de alimento para el ganado que consume sus frutos los cuales se producen en época seca cuando las gramíneas decaen y cuya madera constituía la fuente de combustible para el hogar (Schoch, 1968).

4 - ORIGEN E HISTORIA

Al hablar de los cafetales sombreados de nuestros Andes tenemos la tendencia a referirnos a ellos como "cultivo tradicional". Dado que se trata de una especie introducida, y relativamente reciente, creemos que es importante aclarar esta posición, la cual se deriva del hecho que si bien es cierto que el cultivo no evolucionó como tal en estas montañas, también es cierto que ha sido la base (y la consecuencia) de hondas transformaciones sociales y económicas.

Hace más de medio siglo que el café ha dejado de ser el principal producto nacional para exportación, sin embargo, ha dejado profundas huellas en la estructura de muchas sociedades, en su forma de vida, incluso en la distribución de muchos pueblos.

Estos pueblos nos importan. Nos importan por su gran riqueza humana y porque son una parte fundamental de la región andina. Contribuir a mantener, a mejorar su estabilidad tanto económica como social es algo que nos estimula como investigadores. Y, al igual que con muchos otros procesos, las consecuencias (entre ellas las ecológicas) de la actividad básica desarrollada en la zona se interpretan mejor si se conoce su historia.

4.1. Origen e historia

El café cultivado en América, *Coffea arabica*, parece haberse originado en los macizos de Etiopía, entre los 1350 y los 1800 m.

parece que en su inicio los frutos silvestres del café eran recogidos y guardados secos en pequeñas cantidades para luego ser masticados en momentos de hambre y cansancio. Esta costumbre aún es común en muchos pueblos africanos y permite estimularse, reanimarse, combatiendo la depresión y cansancio. Además, el café fue y sigue siendo utilizado en ritos cotidianos de amistad con diferentes prácticas que van desde el intercambio de semillas y frutos en signo de hermandad hasta el plantar un ejemplar en el jardín del amigo como muestra de lo sólido de la relación (Haarer, 1984). Ambos usos son muy semejantes al uso original (y todavía vigente) de las hojas de coca por parte de los pobladores de Los Andes tropicales en las zonas donde ese arbusto es elemento natural de ciertos bosques.

Se cree que su uso como breva se descubrió en Arabia durante el siglo XV. Su nombre popular y botánico tiene su origen en una de tres palabras árabes: kahwat que originalmente significaba cualquier bebida espirituosa y luego se popularizó para referirse a licor de café; kwwa que significaba inquietud, energía, acción, y Kaffa que es una región del sureste de Etiopía donde se han encontrado varias variedades de esta especie (Heno, 1982).

No hay acuerdo entre los historiadores sobre las vías por las cuales esta especie fue introducida en Europa, aunque se supone que ocurrió entre el siglo XVII y comienzos del XVIII (Adriani, 1984; Purseglove, 1974). Según Heno (1982), fueron los Holandeses quienes en el año de 1690 trasladaron las primeras

semillas a Java de cuyas plantaciones salieron los primeros ejemplares que viajaron al Jardín Botánico de Amsterdam. De allí, un ejemplar fue llevado al Jardín Botánico de París en 1714. En todo caso, en 1737 ya existían establecimientos en Londres y París destinados a la venta de café.

La llegada del café a América es, también, algo confusa. Los responsables de su introducción pueden haber sido: 1) los holandeses, quienes lo trajeron a Surinam, o 2) los franceses, quienes lo trajeron a Cayena y Martinica (Adriani, 1984; Henao, 1982).

En Venezuela, la llegada del café parece deberse al misionero cartellano José Gumilla entre 1730 y 1732, quien según su propio relato en la obra *El Orinoco ilustrado y defendido* sembró las primeras semillas en terrenos de su misión cercana al Orinoco (Henao, 1982). Sin embargo, las primeras plantaciones se hicieron en el valle de Caracas en los alrededores del pueblo de Chacao. Tres haciendas se disputan el honor de ser las primeras con este cultivo (Henao, 1982): "La Floresta" del Pbro. Palacios, ubicada en lo que ahora es la urbanización del mismo nombre, "Blandin" de Don Bartolomé Blandin, ubicada en el actual Country Club, y "San Felipe" del Pbro. José Antonio García de Mohedano, en lo que es hoy La Castellana. Las fechas de estas plantaciones no están claras: según Henao (1982) ocurrió entre 1783 y 1784 pero según Adriani (1984) el hecho se ubica en 1748.

En los Andes venezolanos, el café parece haber llegado primero a Mérida, antes de 1777. De allí, se enviaron semillas a

Don Gervasio Rubio en 1794 quien hizo las primeras plantaciones del Táchira en su hacienda "La Yeguera", lugar donde hoy está la ciudad de Rubio. En Trujillo, el café fue traído de Chacao por Francisco Labastida en 1801 quien lo plantó en su huerta en Mendoza (Adriani, 1984).

4.2. El café como cultivo comercial en Venezuela

No fue sino a finales del siglo XVIII cuando el cultivo del café en Venezuela comienza su desarrollo como plantaciones con fines comerciales, como consecuencia (según Adriani, 1984) de la necesidad de fomentar productos de fácil almacenamiento y conservación con miras a sobrellevar las dificultades de transporte y comercio entre América y el Viejo Mundo debidas a los conflictos políticos de aquel continente en esas fechas. Es así como en 1796, el café alcanza el cuarto lugar entre los productos de exportación venezolanos, después del cacao, añil y algodón, con 602.520 Kg exportados. En 1810, alcanzó el tercer lugar, después del cacao y el añil, con 3.636.360 Kg.

Durante los primeros 30 años del siglo XIX, a pesar de las guerras de Independencia, Venezuela duplica esas exportaciones. Así, en 1830 se exportan 5.247.240 Kg. de café, pasando a ser el primer producto de exportación. Este puesto preponderante en la economía venezolana es conservado durante el resto del siglo XIX (Adriani, 1984).

Las fluctuaciones sufridas en toda la economía agraria nacional durante la segunda mitad del siglo XIX, como

consecuencia de las sucesivas guerras civiles, no impidieron el ascenso de la producción cafetalera. Por el contrario, en el área andina recibió un impulso notable el cual, según Suarez (1982), fue provocado por "dos hechos simultáneos de orden interno y externo". Por un lado, las guerras sucesivas y devastadoras para la región llanera produjeron oleadas migratorias hacia las zonas andinas, zonas que eran más seguras, donde se asentó repentinamente un capital económico y humano que encontró en estas tierras ambientes propicios para cultivar el café y hacer inversiones. Paralelamente, a nivel internacional, el café aumentó notablemente sus cotizaciones. De esta manera, la región andina venezolana vió revitalizada su actividad agraria y se convirtió en un centro económico dentro de la nación (Suarez, 1982). No es casual que los pueblos cafetaleros de la región de Los Pueblos del Sur hayan sido en su mayoría fundados a finales del siglo pasado. Los tres Estados andinos, que en 1847 conformaban el 11% de la población del país, pasaron al 13% en 1873 y a fines de siglo la población regional se había duplicado representando el 17% del total nacional (Suarez & Torrealba, 1985).

Es así como, el cultivo del café ha sido considerado uno de los dos principales factores de incremento demográfico y económico en nuestros Andes entre 1830 y 1930. Pero, así como el auge del cultivo tuvo ese efecto, también se considera que "el colapso de las grandes plantaciones" es una de las cinco causas de la declinación demográfica por intensificación migratoria de la región. Las otras cuatro son: el auge de la producción

petrolera, el control político nacional por hombres de origen andino, la construcción de una red ferroviaria que cambió la forma de contacto con el resto del país y la intensificación del proceso de urbanización que produjo un cambio de valores en la población campesina (Suarez & Torrealba, 1985).

A nivel nacional, el café alcanzó su máxima exportación en 1919, cuando salieron del país 82.382 toneladas. Dos años más tarde había disminuido a la mitad a pesar de que los precios internacionales permanecían estables con tendencia al alza: la creciente industria petrolera iniciada en 1910 parece ser la causa (Henao, 1982). Hasta ese momento las zonas cafetaleras tenían los mayores ingresos, atraían las mayores inversiones de capital y absorbían (durante las cosechas) el mayor volumen de mano de obra básicamente de extracción rural pero también de origen urbano. El cultivo siguió siendo muy rentable hasta 1930. La crisis económica mundial y sobreproducción en Brasil produjeron un progresivo descenso de los precios: en 1940 la producción fue seis veces superior a la demanda (Henao, 1982).

Cuando a partir de 1950 las condiciones mundiales volvieron a ser favorables, Venezuela había derivado su potencial humano e inversiones económicas hacia la industria petrolera, y no reaccionó frente al nuevo estímulo de producción cafetalera.

Según Henao (1982) la situación para la caficultura venezolana ha sido de depresión crónica desde 1959 por falta de rentabilidad. Dice:

*cuando se trata de resolver problemas relacionados con la producción y abastecimiento de productos agrícolas,

la generalidad de los analistas coinciden en centrar las recomendaciones sólo en los factores de créditos, programas de investigación y extensión, vías de comunicación, etc. pero se olvida que por estos medios es difícil estimular al productor que, por sobre todo, aspira a un buen precio por su producto. ... ningún agricultor que proyecte hacer uso de un crédito agrícola, toma éste si no tiene la seguridad de poder cumplir con el compromiso de cancelarlo menos aún haría uso del resultado de la investigación, si de antemano sabe que la puesta en práctica de medidas racionales de producción no será recompensada económicamente. Y esto es sencillamente lo que ha sucedido con la actividad agrícola en el país..."

Pero la opinión más generalizada es la planteada por El Estudio Mundial del Café patrocinado por FAO (Krug & Poerck, 1967) en que:

"los rendimientos excesivamente bajos se deben a que los árboles son viejos, pertenecen en su mayoría a una variedad de poco rendimiento, la plantación es demasiado densa, hay exceso de sombreado, mucha erosión y falta de dirección adecuada de la plantación. La escasez de mano de obra y su elevado coste, como consecuencia de ... la industria del petróleo. ... Otro inconveniente es la falta de carreteras para el transporte del café.

Sin embargo, en 1977, a través de un Decreto, se logró garantizar buenos precios internos, mientras sigue vigente el Convenio Internacional del Café firmado en 1962 entre países productores y importadores que ha permitido una cierta estabilidad del mercado internacional.

5 - FORMAS DE CULTIVO

5.1. Distintas formas

Existen básicamente tres formas de cultivar café. Ellas responden a tres enfoques diferentes que a su vez pueden o no relacionarse con distintas situaciones ambientales y socioeconómicas.

En las fincas de grandes extensiones, sobre todo en países donde el café es un producto importante de exportación, la forma que se impuso desde un inicio fue la del monocultivo. Antiguamente, este monocultivo consistía en grandes plantaciones de arbustos de *Coffea arabica* var. *arabica* que formaban un sotobosque sombreado con árboles de una o máximo dos especies del dosel de la selva original, cualquiera que esta fuera, escogidos por su compatibilidad con el café y por la calidad de su sombra que no debía ser ni muy densa ni muy laxa.

Con la creación de variedades resistentes a la insolación y más productivas se inició una nueva era en el cultivo del café, cuyas controversias con la forma anterior ya hemos discutido. Rápidamente estas nuevas variedades fueron adoptadas por grandes fincas en Africa y América, tomando el papel que en la economía tenían de las plantaciones sombreadas. De todas formas, no han podido igualar la calidad del café de sombra.

Una tercera forma de cultivo ha ido tomando cuerpo sobre todo en fincas de tamaño más reducido atendidas a nivel familiar, son los llamados cultivos mixtos. Sin embargo, a pesar de muchas

críticas a su inconveniencia para grandes plantaciones, es una forma muy utilizada.

5.2. Cultivos mixtos

Vishveshwara & Jacob (1983) dicen *"siempre es preferible cultivar más de un rubro en una unidad de área, porque ayuda a enfrentarse a la fluctuaciones tanto del clima como del mercado"*. Muchos autores piensan así, por fortuna, en especial aquellos formados en países tercermundistas donde los pequeños productores no cuentan más que con su iniciativa y previsión para sobrellevar los cambios ambientales y de mercadeo.

El café es un cultivo que se presta para desarrollar cultivos mixtos, sin embargo, algunos autores opinan que los árboles y otras especies distintas a café pueden competir tanto con él que disminuyan mucho la productividad del cafetal. En Sri Lanka (Vishveshwara & Jacob, 1983), uno de los principales productores mundiales, en la estación experimental de Matale, preocupados por las consecuencias de este tipo de competencia, han determinado la óptima distribución y densidad para cultivar café de distintas variedades sin que se afecte su productividad mezclados: 1) con plantas de coco (2,5 m entre planta para *C. canephora* y 1,2 m para *C. arabica* poniendo 3 filas de café por 2 filas de coco) o 2) con naranjos y plantas sombreantes muy altas (2 m entre individuos de *C. arabica* y cada 5 filas una de naranjos espaciados 4 o 6 m y por encima de todos ellos árboles de altura espaciados 15 o 17 m).

La diversidad en la obtención de recursos es lo más importante en los cafetales mixtos. Por ejemplo, en los cafetales mixtos del Estado de Veracruz se utilizan flores, frutos y tallos de árboles sombreantes para alimentación humana y de animales, así como para usos medicinales, para labores en la finca o como combustible (Hoffmann et al, 1987).

Pero los cultivos mixtos no sólo son importantes por la diversidad de productos. En algunos casos han mostrado mejores condiciones del sistema como un todo. En México, Jimenez Avila (1979, 1982) a través de varios trabajos ha discutido las características de los cultivos mixtos de café frente a otras formas como cultivos de sol, o cultivos con sombra de una sola especie. En la mayoría de los casos se trata de plantar café sombreado con *Inga jinicuil*, *Inga leptoloba*, *Musa sapientum* y *Citrus sinensis*. Este cultivo mixto produce la mayor cantidad de materia orgánica anual como hojarasca (10249 Kg.ha⁻¹, mientras que con otras sombras monoespecíficas entre 8400 y 9500 Kg.ha⁻¹, la menor producción se obtiene con cultivos al sol 6042 Kg.ha⁻¹).

5.3. Respuestas a problemas de erosión:

Las consecuencias visibles, en muchos cafetales, de los procesos erosivos son tan notables que, incluso sin estudios cuantitativos, la preocupación de los caficultores por los problemas derivados ha sido grande. Tanto productores como agrónomos han propuesto y practicado distintos sistemas tendientes a contrarrestar una de las consecuencias más palpables:

la disminución del rendimiento. Desde el punto de vista del Estado esta no tendría porque tener mayor prioridad que las consecuencias ecológicas de mediano y largo plazo, cuyo tratamiento constituye un pasaporte hacia el futuro, sin embargo las motivaciones económicas a corto plazo son muy comprensivas. En todo caso es interesante notar en qué sentido se ha trabajado, qué puntos de la erosión se han tenido en cuenta.

Varios estudios realizados en Costa de Marfil y citados por Coste (1969), mostraron que el uso de plantas auxiliares que aumenten la cobertura en las entrelineas del cultivo tiene un buen efecto moderador del impacto de las gotas de lluvia sobre la disgregación de la capa superficial del suelo. El cuidado a tener es respecto a que se utilicen especies con sistema radical que no compita con los cafetos y se ha cuidado con mayor atención la competencia por agua.

En Kenia y Tanzania (Coste, 1969), el empajado o "mulching" ha sido estudiado y aplicado con aumentos notables de productividad. Según Vishveshwara & Jacob (1983) en Colombia se han visto incrementos de 30% en producción con la aplicación de empajado y en Brazil se logró 70%. Consiste en colocar en las entrelineas una cama de paja. Se ha notado que: constituye una capa termoreguladora, disminuye las pérdidas por evaporación, retarda el desarrollo de malezas, constituye un aporte extra de nutrientes, estimula la producción de raíces (absorbentes y primarias) del cafeto, disminuye la erosión. Sin embargo su elevado costo y el peligro de aumento de incendios ha frenado su aplicación.

En terrenos pendientes, la tendencia ha sido la de contrarrestar el escurrimiento superficial y el material arrastrado por el mismo. Se señala: plantación por curvas de nivel, apertura de zanjas (en las que el agua se retiene momentaneamente y deposita el material arrastrado, la construcción de bandas donde se deja la vegetación espontánea cada cierto número de líneas de café, y finalmente la construcción de terrazas (Coste, 1969; Hoffmann et al., 1987).

II - SOBRE EL BALANCE HIDRICO A NIVEL DE ECOSISTEMAS Y EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS EROSIVOS

1. BALANCE HIDRICO

La dinámica del agua puede enfocarse de distinta forma dependiendo de la escala de estudio y del problema que se desea tratar. En nuestro caso particular, queremos centrarnos en el balance hidrico a nivel de un agroecosistema al que podemos trazar límites teóricos que facilitan el análisis y dentro de los cuales podemos definir varios compartimientos dependiendo de nuestro interés en profundizar sobre las modificaciones sufridas por el contenido de agua al pasar por distintos sectores del agroecosistema.

Es indispensable en el estudio con sistemas el poderlos delimitar bien, en el tiempo y en el espacio, y poder definir en ellos los compartimientos claves (en este caso desde el punto de vista hidrico) junto con los flujos que los relacionan.

Incluimos dentro del sistema cafetal toda su vegetación (cafetos, árboles sombreantes, malezas) y el o los horizontes funcionales del suelo, es decir, aquellos directamente relacionados con el sistema radical de la vegetación. La atmósfera y los horizontes no funcionales y subsuelo son las fuentes adyacentes con las que nuestro sistema intercambia agua,

nutrientes y otros materiales. Los ecosistemas o agroecosistemas vecinos no son considerados en este estudio.

Los compartimientos que definimos dependen de aquellos puntos en el sistema en los que existe un cambio que puede afectar el contenido del agua que circula por el sistema, ellos son: el agua que llega al sistema (precipitación total), el agua retenida por el follaje (intercepción), el agua que llega al suelo (precipitación efectiva), el agua que se mantiene en los horizontes funcionales del suelo (agua del suelo), el agua que se pierde hacia la red de drenaje de la cuenca por: a) drenaje superficial, b) drenaje oblicuo y c) drenaje profundo, y finalmente el agua que se pierde por devolución a la atmósfera: a) evaporación y b) transpiración de las plantas (en general el agua interceptada es evaporada y puede considerarse en esa categoría).

No creemos necesario referirnos a un parámetro tan utilizado y conocido como la precipitación total, sino sólo recordar que 1) sus variaciones espaciales pueden ser muy importantes a corta distancia y en consecuencia las mediciones deben hacerse en la propia área de estudio y no confiar en estaciones meteorológicas al menos que se encuentren a pocos metros y 2) que en los ambientes de baja pluviosidad pero alta altitud las llamadas precipitaciones ocultas (intercepción de neblina, condensación de rocío) no deben ser ignoradas.

Con respecto a los otros compartimientos, haremos a continuación un resumen de como han sido enfocados por otros

autores.

1.1. Intercepción y precipitación efectiva

Son dos de los compartimientos más importantes en el balance hídrico de sistemas con vegetación y deben tratarse juntos pues cada uno depende estrechamente del otro. Tienen el sentido de evaluar cuanto afecta la vegetación a la llegada al suelo del agua de precipitación, pues puede alterarse tanto el monto total de agua, como su redistribución en el espacio, la disminución de su energía cinética, su composición química (Sarmiento, 1984).

Su estudio debe tener en cuenta por lo menos tres medidas: precipitación total en el sitio, precipitación a nivel del suelo y escurrimiento por los troncos. La importancia del escurrimiento por los troncos depende de la arquitectura de las plantas, particularmente del tamaño y forma de las hojas y del tamaño de las ramas y su ángulo de inclinación respecto al tronco. Algunos autores consideran aparte el goteo de las ramas (que muestra una concentración de agua especial) pero si los pluviómetros de suelo están bien repartidos esta medida no es muy importante (Slatyer, 1968; Rutter, 1963). Aunque la mayoría de los estudios sólo consideran las especies leñosas, en las especies herbáceas en las que se ha medido los valores son importantes (Brady, 1984; Acevedo, 1988).

La intercepción no depende solamente de las características de la vegetación sino que es muy importante la frecuencia e

intensidad de las precipitaciones: para un mismo total anual la interceptación es mayor si las lluvias son finas y mucho menor si son de intensidades fuertes. Hemos tratado de analizar las consecuencias sobre la precipitación efectiva de distinto tipo de lluvias en un ambiente forestal siempreverde y hemos resumido esta interpretación en la Figura II-1.

Las medidas tomadas por varios autores cuadran con esta interpretación, por ejemplo Aussenac (1977) y Nizinski & Sauquier (1988) dan respectivamente valores de 30 a 40% el primero y 34% los segundos para ambientes templados de lluvias finas (cuadrante inferior izquierdo). Es también en el trabajo de Nizinski & Sauquier (1988) que encontramos uno de los pocos datos que corresponden al cuadrante inferior derecho: analizan con especial cuidado el papel de los lapsos con precipitación menor de 10 mm y encuentran que cuando los eventos de lluvia ocurren intermitentemente, dejando entre ellos períodos sin lluvia, la precipitación efectiva puede ser nula si cada evento es menor que la cantidad que la vegetación es capaz de retener. Para su caso particular, calculan como capacidad máxima de retención de agua por interceptación 2,2 mm en invierno cuando no hay follaje y 3,04 mm en verano cuando el follaje es completo. Esto es también una muestra de cuán importante es hacer seguimientos fenológicos en las áreas donde se realizan estudios de balance hídrico. Rutter & Morton (1977), probando un modelo sobre interceptación en bosques pero sólo para intensidades muy bajas suministra datos que están de acuerdo con la Figura II-1 (Figura II-2).

El agua de interceptación en general se piensa que es

FRECUENCIA INTENSIDAD	ALTA sin tiempo para evaporar	BAJA con tiempo para evaporar
aguaceros > 15 mm/h	$Pe \approx Pt$ Pe muy alta In muy baja	Pe alta a media In baja a media
lloviznas < 1 mm/h	Pe media a baja In media a alta	$Pe \approx 0$ $In \approx Pt$

Pe : precipitación efectiva
 Pt : precipitación total
 In : intercepción

FIGURA 11.1 : Características de las lluvias y su efecto sobre precipitación efectiva e intercepción.

evaporada de la superficie de hojas y ramas, y parece correcto pensarlo así puesto que los pocos datos que hay sobre absorción por parte de las hojas a través de la cutícula muestran que esta fracción es insignificante frente al agua interceptada (Rutter, 1963).

Las TABLAS II-1 y II-2 muestran algunos valores de porcentaje de intercepción para localidades tropicales y extratropicales.

TABLA II-1 : Intercepción anual en ambientes forestales tropicales		
SISTEMA	INTERCEPCION	FUENTE
selva húmeda tropical Puerto Rico	12 al 20%	Kline et al., 1968
selva húmeda tropical de Puerto Rico	34%	Jordan et al., 1973
bosque secundario Nigeria	17%	Lawson et al., 1981
bosque Costa de Marfil	14%	Roose, 1979

TABLA II-2 : Intercepción anual en ambientes forestales extratropicales		
SISTEMA	INTERCEPCION	FUENTE
bosque mediterráneo <i>Quercus ilex</i> , denso	32%	Rapp & Romane, 1968
no denso	28%	"
bosque mediterráneo <i>Pinus halepensis</i>	79%	"
bosque templado <i>Quercus petraea</i> , media	29%	Nizinski & Saugier, 1988
invierno, sin hojas	22%	"
verano, con hojas	34%	"
bosque templado, Inglaterra de <i>Pinus sylvestris</i> y <i>Betula pubescens</i>	32%	Ahmad-Shah & Rieley, 1989
de <i>Alnus glutinosa</i>	21%	"
de <i>Betula pubescens</i> <i>Sobus aucuparia</i> y <i>Quercus robur</i>	20%	"

1.2. Drenaje superficial o escorrentía

Cuando el agua de precipitación efectiva llega al suelo parte se evapora, parte se infiltra y parte resbala por la superficie del suelo: esta última parte se denomina drenaje superficial o escorrentía cuyo destino es: 1) engrosar la salida de agua general del drenaje de la cuenca a través de quebradas y ríos o 2) infiltrarse en un sistema adyacente. La importancia de cada una de las tres partes en que se divide el agua de precipitación efectiva depende de las características del suelo, sobre todo de su superficie, su pendiente y las condiciones microclimáticas de la atmósfera inmediatamente sobre él. De hecho la escorrentía es formada por el agua que no sigue ninguno de los otros procesos (evaporarse o infiltrarse) (Slatyer, 1968).

De esta manera, cuando la capacidad de infiltración de un suelo disminuye el drenaje superficial aumenta. Esa disminución de infiltración puede ocurrir por encontrar capas de textura más pesada o por saturación de agua (de la napa freática, de un evento de lluvia anterior o de los primeros momentos del evento en cuestión). Horton (1940, citado por Acevedo, 1988) hizo un cuidadoso análisis de un caso particular en el que tomó un evento de lluvia y analizó las variaciones en el tiempo de capacidad de infiltración, escorrentía y retención superficial: encontró que para una lluvia de 35 min. los primeros 10 min (con intensidad 1,5 cm/h) no generaron ni escorrentía ni retención superficial sino que todo se infiltró pero la capacidad de infiltración fue disminuyendo a medida que el agua llenó los espacios del suelo

la *agua de embebeción*, Roose, 1981) ; los siguientes 5 min (con 11 cm/h) la mayor parte del agua quedó en las irregularidades de la superficie y una poca se infiltró pero la *escorrentía* no había comenzado aún; los siguientes 12 min (la intensidad fue bajando de 11 cm/h a 3 cm/h) comenzó el proceso de *escorrentía* llegando a su máximo a los 4 min pero disminuyendo lentamente, lo mismo que la *retención superficial*; la lluvia acabó a los 35 min pero la *escorrentía* que había comenzado casi a la mitad del evento, continuó todavía durante cerca de unos 20 min, naturalmente cada vez con menor intensidad. Este tipo de análisis permite conocer para un cierto suelo bajo que condiciones existe *drenaje superficial*: cuanto es el *agua de embebeción* y cuanto frena el *microrelieve*; pero son sin duda laboriosos y requieren controlar todas las variables.

Esa *agua que corre sobre el suelo en el sentido de la pendiente* es de gran importancia, entre otras cosas, porque es el medio de transporte de la *erosión hídrica*. En consecuencia, su medición y su capacidad de arrastre de material del suelo han sido motivo de numerosas *estudios* (Fullen, 1985; Fullen & Reed, 1986; Hurni, 1984; Mass et al, 1988; Mishra & Ramakrishnan, 1983; Roose, 1981; Wischmeier, 1974; etc). El mayor énfasis se ha puesto en *suelos de agroecosistemas*. Allí, el efecto de actividades como *arado, paso de maquinaria, pisoteo, etc.* ha sido estudiado en cuanto a los cambios que produce a nivel de la *capacidad de infiltración*: a causa de una *compactación del horizonte superficial* la *infiltración* disminuye enormemente (Wilkinson & Ania, 1976; Trowse & Bayer, 1965), Fullen (1987)

midió hasta un 80% de disminución por actividades agrícolas mecánicas, con el consecuente aumento en drenaje superficial (capítulo II-2.2).

Aparte de la capacidad de infiltración del suelo, la escorrentía depende de la pendiente y la cobertura vegetal. Sobre esta última, las características de su efecto son difíciles de observar si no se independiza de los valores de intercepción. Aparentemente los mayores efectos de la vegetación con respecto a la escorrentía se deben al freno que impone a la energía de las gotas de lluvia y a la disminución de la evaporación (que actúa sobre el agua represada en las irregularidades de la superficie del suelo y que eventualmente puede escurrirse). Los estudios que permiten comparaciones de varios años como los de Roose (1981) permiten ver que bajo una misma vegetación forestal las proporciones de drenaje superficial se mantienen de un año a otro independientemente de la precipitación total. Verney & Volkoff (1967 al 69) y Willaime (1962, 1965) han obtenido resultados semejantes (cita de Roose, 1981).

Por el contrario, en general el aumento de la pendiente tiene a un aumento del drenaje superficial. La explicación más evidente es que la gravedad es uno de los elementos claves en el proceso de escorrentía. Pero la relación entre pendiente y escorrentía no es tan clara como se pudiera pensar. Quizás lo más interesante es ver la magnitud de ese efecto. Por ejemplo, Roose (1981) bajo un mismo tipo de bosque secundario encontró la siguiente variación, donde se observa que la relación no es lineal:

pendiente	escorrentía
11%	0.1%
23%	0.3%
65%	0.5%

Las causas por las cuales esto ocurre no son claras. Roose (1981) sugiere una explicación basada en que al aumentar la pendiente el agua es capaz de cavar surcos y modificar en diversas formas la rugosidad de la superficie del suelo y que esto aumenta la superficie por la cual el agua puede infiltrarse además de que aumenta también la porosidad al arrastrar parte del material fino.

Lal (1975, citado por Roose, 1981) encontró que por debajo de 15% de pendiente no hay diferencias significativas (Ibadan, Nigeria). Sin embargo, Fullen & Reed (1986) encontraron variaciones muy importantes dentro de ese rango (suelo desnudo, Inglaterra) (TABLA II-3):

TABLA II-3 : Relación entre pendiente, escorrentía y erosión				
pendiente %	junio 1982- j. 1983		junio 1983- j. 1984	
	escorrentía %	erosion t.ha ⁻¹	escorrentía %	erosion t.ha ⁻¹
7,8	62	17,1	30	4,9
8,1	71	22,4	34	12,3
10,7	51	11,2	30	14,0
12,7	64	45,9	54	48,7
13,1	72	87,6	66	64,1
14,1	67	48,9	64	65,5
15,1	74	73,4	49	67,1
15,2	51	68,5	47	57,9

Estos autores encontraron que las diferencias si son significativas pero no muestran relación con la pendiente. Por el contrario, la erosión en términos de pérdida de fracción mineral mostró una clara relación con la pendiente ($r=0,79$ y $r=0,95$ para 1982-83 y 1983-84 respectivamente). Ellos analizaron con cuidado cada evento de lluvia y atribuyeron las variaciones de un año a otro y entre las diferentes parcelas a los distintos efectos combinados de: intensidad de los eventos de lluvia y tiempo transcurrido desde el último evento contra características de la superficie del suelo como contenido de materia orgánica, microtopografía y estructura.

Como vemos las relaciones pueden ser muy complejas y el análisis de los procesos seguirá requiriendo alto grado de minuciosidad hasta tanto no se encuentren reglas generales.

Ahora bien, a otra escala de análisis, donde los montos globales son más importantes que los procesos y donde las diferencias entre tratamientos son más notables que las variaciones internas de las parcelas, pueden hacerse comparaciones más simples que dan información sobre problemas particulares.

1.3. Drenaje oblicuo

El drenaje superficial existe cuando el agua de precipitación efectiva choca con un medio distinto al que viene circulando, es decir pasa de aire o tronco a suelo, y entonces parte del agua sigue la vía de menor resistencia resbalando sobre la superficie del suelo. De la misma manera, la fracción de agua que penetra en el suelo infiltrándose puede encontrar dentro de él planos de menor porosidad frente a los cuales parte del agua en vez de seguir el drenaje vertical se deja resbalar en el sentido de esos planos: esa agua constituye el drenaje oblicuo.

En general este tipo de drenaje no es estudiado pero algunos autores han hecho un esfuerzo importante en tratar de evaluar su importancia. Roose (1979a, 1979b, 1981) es uno de los que más ha trabajado en este sentido mediante parcelas de distinto tamaño ubicadas en seis localidades distintas y evaluando en cada caso los movimientos oblicuos a seis profundidades dentro del suelo. Sus conclusiones son muy interesantes:

- 1) encontró una relación directa entre la ocurrencia de aguaceros y pérdidas de agua por este drenaje, si se expresa esa agua en % de la precipitación total sus datos revelan valores entre 1 y 7% después de lluvias importantes, pero
- 2) en el balance hídrico anual las pérdidas por drenaje oblicuo son insignificantes respecto al resto de los compartimientos (calculó entre 0,03 y 0,5% del total de precipitación).

Roose (1968, 1981) diseñó un dispositivo de campo que llamó

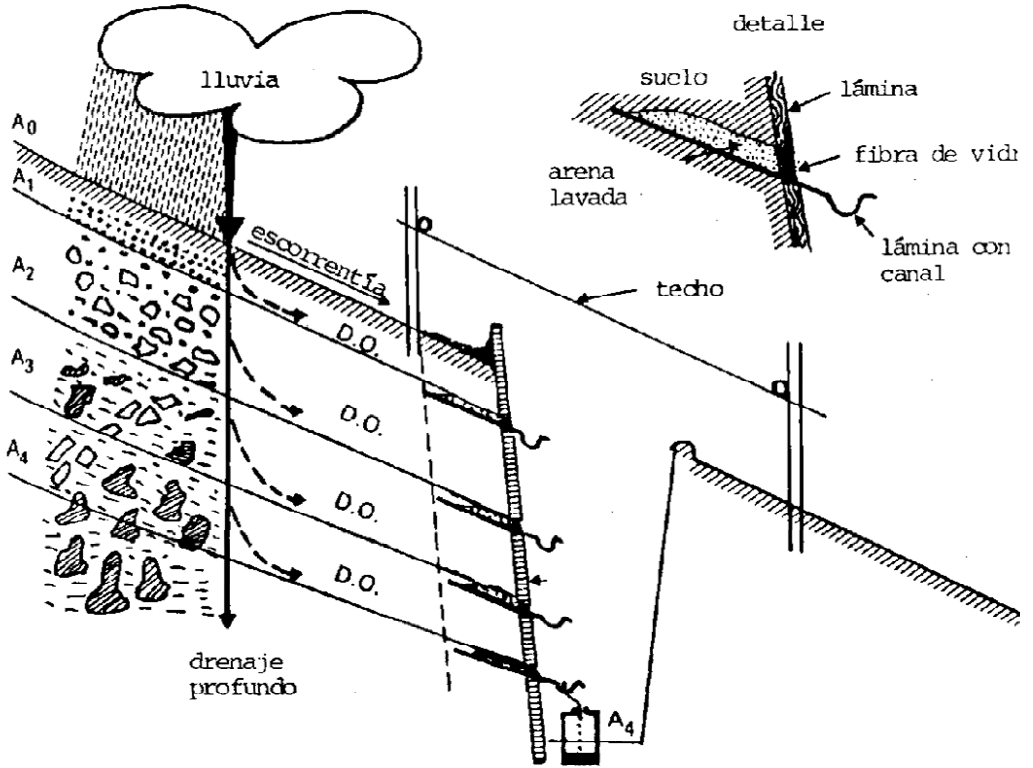


FIGURA 11-3 : Esquema de un dispositivo ERLO para drenaje oblicuo, Tomado de Roose, 1981.

1988) sobre cuya construcción, ventajas y desventajas Roose (1981) se extiende ampliamente. Lo que todos deben cuidar es (se deduce del primer párrafo) que la variación sea mínima por los dispositivos que se instalan sobre todo en cuanto a la estructura del suelo, la secuencia natural de sus horizontes y la densidad y distribución de raíces, es decir, se trata de no alterar aquellas características del suelo que controlan el movimiento del agua en él y aquellas que determinan su pérdida en forma gaseosa (evaporación y transpiración de las plantas).

No hay metodologías perfectas para esta medida, por lo que se requieren mecanismos de control cualquiera que sea el sistema empleado, mecanismos que con frecuencia son tan engorrosos como los sistemas mismos. Es quizás por todo ello que los trabajos sobre balances hídricos completos a nivel de ecosistemas (o agroecosistemas) no son muy comunes. Existe una amplia bibliografía sobre otros compartimientos del balance hídrico pero se hace difícil cerrar el balance anual sin la medición de este drenaje. De todos modos existe forma de calcularlo a partir de medidas cuidadosas de infiltración y contenido de agua más o menos continuo de cada horizonte (Pontallier et al, 1988; Nizinski & Saugier, 1988).

El lisímetro que ha mostrado mejores resultados es el monolítico, pero para los que estamos interesados en sistemas forestales, este método tiene problemas serios. En realidad, no es posible instalar un lisímetro monolítico que respete el sistema radical, el cual en estos ambientes suele ser profundo, ocupar gran espacio por especie y (en el caso de bosques

tropicales naturales) comprender muchas especies. Si además, el suelo contiene en todo su perfil una importante pedregosidad, los sistemas de cálculo por diferencias de contenido de agua no son fáciles de aplicar. El método más adaptable a estos ambientes parece ser el de lisímetros abiertos cuidando de disminuir al máximo el efecto de ruptura de la columna capilar de agua por cambios de porosidad entre el suelo y el material artificial.

1.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración es también uno de los elementos del balance hídrico complicados de medir en el campo, y su dificultad aumenta con la heterogeneidad de la vegetación. Es por ello que desde hace mucho, numerosos autores han hecho esfuerzos por diseñar métodos indirectos para conocerla, en general a través de fórmulas matemáticas con distintos grados de complejidad y requerimientos. En la TABLA II-4 presentamos algunos de ellos. Los diseñadores de estos métodos han tratado de :

- 1) construir fórmulas de estructura matemática sencilla, fáciles de calcular
- 2) trabajar con datos climáticos que se obtienen de medidas estandarizadas mundialmente, de modo de hacerlas lo más universales posible y lo más independientes de la vegetación posible
- 3) que la universalidad de la fórmula no le quite aplicabilidad, no disminuya su exactitud en distintas regiones del mundo.

TABLA II-4 : Fórmulas comunes para el cálculo de evapotranspiración

AUTOR	FORMULA
TURC, L. 1961	$ETP = \left(0,4 \frac{t}{t + 15}\right) \cdot \left(\frac{h}{H} + 0,18\right) I_q + 50$ <p> t = temp. media mensual ($^{\circ}C$) h = insolación (en horas) H = horas de sol diarias según latitud I_q = radiación solar (cal. cm^{-2}, día$^{-1}$) según mes y latitud </p>
THORNTONWAITE, C.W. 1948	$ETP = 1,6 (10 \cdot T/I)^a$ <p> ETP: evapotranspiración potencial T : temperatura media mensual I : índice calórico que es la sumatoria de los 12 valores de i </p> $i = (T/5)^{1,514}$ <p> a : función cúbica de i </p>
PENMAN, H.L. 1963	$ETP = (0,017 R \cdot \Delta / V + Eat) / (\Delta / V + 1)$ <p> ETP: evapotranspiración (mm/día) R : radiación neta (cal/cm2/día) Δ : pendiente de la curva de presión de vapor de saturación V_s temperatura , la temperatura del aire V : constante psicrométrica Eat: $0,26 \cdot (1+u/1,86) \cdot (e_a - e_d)$ donde, u: velocidad media del viento (m/seg) a 2m sobre el suelo $e_a - e_d$: media del déficit de saturación de vapor de agua del aire a temperatura ambiente (mb) </p>
PAFADARIS, J. 1961	$ETP = 5,625 \cdot (e_{ma} - e_d)$ <p> ETP: evapotranspiración potencial mensual (mm) e_{ma}: presión de vapor de saturación de promedio del máximo diario d temperatura en el mes (mb) e_d : presión de vapor promedio mensual (mb) </p>

TARLA II 4 : continuación ...

AUTOR

FORMULA

HANON, W.R. 1965

$$ETP = 0,0055 \cdot D^2 \cdot P_s$$

ETP: promedio de evapotranspiración potencial (pulgadas/día)
 D : longitud del día en unidades de 12 horas
 P_s : humedad absoluta de saturación (g/m^3)
 esta fórmula sólo requiere la latitud (para calcular la longitud del día) y la temperatura media (para calcular la densidad de vapor de saturación)

BLANEY, H.F. & CRIDDLE, W.D. 1950

$$ETP = (K(T.P)/100) (114-HR)$$

ETP: evapotranspiración potencial
 $K = 1,71$
 T : temperatura en $^{\circ}C$
 P : precipitación
 HR: humedad relativa

IA. J. & LOPEZ, J. 1970

$$ETP = 1,21 \cdot 10^3 (1 - 0,01 HR) + 0,21T - 2,30$$

ETP: evapotranspiración potencial en mm/día
 T : temperatura media en $^{\circ}C$
 HR : humedad relativa media de horas diurnas

$$i = 7,45 T / (234,7 + T)$$

Omar, 1968

Rosse, 1982

García & Lopez, 1970

Muchas de estas fórmulas se ha probado que dan estimados suficientemente buenos en muchos lugares. Los investigadores que trabajan en problemas de balance hídrico a nivel de ecosistemas o agroecosistemas seleccionan el método a usar de acuerdo a sus intereses específicos y a la disponibilidad de datos climatológicos. Por ejemplo, Roose (1979, 1981) y el equipo de franceses que trabajan en Costa de Marfil han utilizado con éxito la fórmula de Turc (versión 1961), pero para ello se requiere registro continuo en el campo de temperatura e insolación.

En países como el nuestro la mayoría de las fórmulas no son aplicables más que a localidades muy contadas por requerir datos que no son tomados por el grueso de nuestras estaciones meteorológicas, como insolación, radiación, viento, etc. García & López (1970) han propuesto una ecuación más adaptada a las latitudes intertropicales que requiere registros de temperatura media y humedad relativa media de las horas diurnas. Ellos calcularon la desviación de los valores de EIF obtenidos por varias fórmulas (entre ellas la suya) y la evapotranspiración medida en cinco estaciones experimentales: de acuerdo con sus cálculos la fórmula propuesta por ellos generó valores mucho más cercanos a la realidad que ninguna de las otras, lo cual ellos atribuyen al hecho de haber diseñado la ecuación especialmente para ambientes tropicales. Andressen (1971) discute la validez de ésta y otras fórmulas en estaciones tropicales que van de 20 a 400 m de altitud, que fue lo máximo que encontró para estaciones con medidas de evapotranspiración en alturas. Sus conclusiones son interesantes pues la fórmula de García & López mostró en todo

momento una alta correlación con las variaciones mensuales de ETP, de hecho fue la única en mostrar ese ajuste mensual, sin embargo, para los totales anuales mostró una clara sobreestimación comparada con las fórmulas de Thornthwaite, Penman y Turc. Esta preocupación por el comportamiento de las fórmulas empíricas en ambientes tropicales de montaña es compartida por varios autores, pero la formulación de nuevas ecuaciones o la corrección de las existentes se ha hecho difícil y no pasa más allá de soluciones locales (Lambert & Chitrakar, 1989).

El uso de fórmulas basadas en factores climáticos no es la única forma de estimar o inferir el monto de la evapotranspiración, ellas en realidad dependen demasiado de factores climáticos y sus valores sólo reflejan la capacidad evaporativa del aire, pero la vegetación real no puede ser considerada: la relación propuesta para estimar la evapotranspiración real a partir de la potencial y del contenido de agua del suelo es una salida muy útil pero no muy precisa.

La estimación de la evapotranspiración real como diferencia entre las entradas de agua al sistema y las salidas por drenaje da una buena aproximación. Por ejemplo, Acevedo (1988) en un estudio de balance hídrico en dos agroecosistemas venezolanos infirió la evapotranspiración de la diferencia entre la medida de entrada de agua por precipitación y la medida de salida por drenaje (superficial y profundo) así como el almacenamiento en el suelo. Es decir, pudo medir experimentalmente todos los compartimientos del balance hídrico anual quedándole como única

incógnita la evapotranspiración.

Este es el mismo criterio, aunque a distinta escala, que se ha utilizado en estudios de balance hídrico a nivel de cuencas. Podemos citar como ejemplo los estudios realizados en Hubbard Brook (Estados Unidos) dirigidos por Likens (Likens et al, 1977), quienes aprovechándose del hecho de encontrarse en una cuenca sobre un basamento impermeable consideraron que todo lo que se perdía por evapotranspiración (anualmente) era la diferencia entre lo que entraba por precipitación y lo que salía por drenaje en el río principal (ambos cuidadosamente medidos).

Jiménez & Golberg (1982), en su trabajo sobre balance hídrico en cafetales mexicanos, utilizaron el criterio de Slatyer (1967) según el cual la evapotranspiración es igual a la variación del contenido de agua en el suelo durante el lapso entre dos precipitaciones o dos ciclos de riego. Naturalmente, esto implica medidas continuas y cuidadosas del agua en el suelo (que en este caso se calcularon a partir de medidas de tensiómetros) simultáneamente con entradas por precipitación o riego.

En los casos anteriores, esta medida de pérdida de agua gaseosa de los sistemas es considerada como una unidad en la cual no importa la procedencia del agua ni los procesos que intervienen en la pérdida. Sin embargo, esa diferenciación es realmente importante. Pontailier, Nizinski & Saugier (1988) discuten dos modelos de balance hídrico a nivel de sistemas forestales en los cuales se da peso a esas pérdidas: se

diferencia entre el agua transpirada, el agua evaporada del follaje, el agua evaporada de la hojarasca y el agua evaporada del suelo. Sin duda, se trata de cuatro compartimientos implicados en la evapotranspiración real y que tienen dinámicas diferentes, y por ende consecuencias distintas bajo varios sistemas.

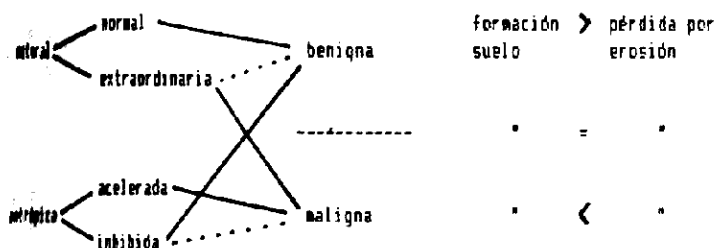
2 - EROSION

2.1. Enfoques y conceptos

El término erosión no siempre se ha utilizado para describir el mismo proceso: hubo una época en que se llamó así sólo al arrastre de material grueso por los ríos, dando otros nombres al movimiento de materiales por factores y procesos distintos al fluvial. Hoy en día la mayoría de los autores utilizan la palabra *erosión* en un sentido mucho más amplio para referirse a la separación y remoción del suelo y/o del material parental subyacente causada por cualquier factor externo (Zachar, 1982). Dependiendo del factor causante, la erosión recibe distintos calificativos: por ejemplo, erosión eólica (por viento), erosión química (cuando intervienen procesos de disolución, corrosión), erosión antrópica (por actividades humanas) etc.

La erosión ha sido presentada como uno de los principales procesos que llevan a la "degradación de un suelo" (Gauck, 1978), concepto este último que fue descrito por Riquier (1977) como el resultado de uno o varios procesos que disminuyen las posibilidades reales o potenciales de un suelo de producir cualitativa o cuantitativamente productos o servicios.

Zachar (1982) ha hecho una importante revisión de términos y definiciones relacionadas con erosión. Propuso una clasificación general de erosión de suelo para aclarar algunos conceptos como natural, antrópica, benigna y maligna, cuyas relaciones se establecen en el siguiente esquema:



donde: natural significa sin intervención del hombre. normal significa que la erosión ocurre en un suelo de perfil normal que es aquel que desarrolla horizontes génicos y se forma bajo condiciones ambientales favorables. La clasificación prevé que no toda erosión natural es normal y benigna sino que bajo ciertas condiciones la pérdida de material puede ser tan grande que no sea recuperable (maligna) y también que no toda acción humana conlleva la pérdida de suelo sino que ciertas prácticas diseñadas para evitar erosión funcionan como verdaderos inhibidores de ese proceso.

Se nota que el límite entre una erosión benigna y maligna viene dado por el equilibrio entre formación del suelo y pérdida del mismo; cuando la primera se mantiene menor que la última la recuperación del suelo no es posible. Así, en el análisis de procesos erosivos concretos, como los efectos desestabilizadores de laderas por erosión, no es suficiente con estudiar el arrastre de material por drenaje sino que debe conocerse paralelamente la tasa de formación del suelo (Hurni, 1983; Zachar, 1982), de esta manera se puede hacer un balance y saber realmente cuan nocivo es el proceso erosivo que se está estudiando. Según Bennett et al (1951) muchos autores piensan que la erosión "normal" es beneficiosa por su estímulo a mantener activos los procesos

pedogénicos y en consecuencia un continuo impulso a la regeneración del suelo y al flujo de nutrientes y energía. De todas formas el considerar cierta erosión como muy fuerte o por el contrario como aceptable no es algo trivial: la tasa de formación de un suelo depende de tantas variables que no puede darse reglas universales. De todas formas, existe consenso en que cuanto más delgado sea un suelo mayor será su tasa de formación hasta alcanzar cierta profundidad donde el proceso se estabiliza; este umbral depende de las condiciones del lugar pero en general es de unos 20 a 30 cm (donde las variaciones climáticas se atenúan) (Zachar, 1982).

También existe consenso en decir que cuanto menos profundo es un suelo más peligrosa es su pérdida y también que aun siendo una pérdida pequeña en cuanto a masa de material, es decir aun cuando la erosión sea débil, la remoción de las partículas más finas o solubles va empobreciendo el suelo progresivamente afectando su fertilidad. Por ello Zachar (1982) insiste en que una pérdida mayor de $750 \text{ Kg. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ puede ser muy peligrosa si se mantiene en el tiempo.

Es esa relación entre formación y pérdida del suelo la que llevó a la definición de **erosión compensable** es decir aquella cantidad de suelo que puede perderse sin perjuicio para el mismo, aquella que será "compensada" por el proceso de formación (Zachar, 1982).

Smith & Stamey (1964, 1965) plantearon el término de **erosión permisible** o **tolerable** como una medida más realista o más

A II-5 : FORMACION DE SUELOS

ator SITIO	Kg.ha ⁻¹	grosor del suelo desarrollado	tiempo de formación años
promedio de formación de suelo para la superficie terrestre		10 cm	1.000
sobre roca madre con buena cobertura vegetal y buenas condiciones de meteorización	324 a 1.620	2 o 3 cm 0,026 mm a 0,13 mm	200 a 1.000 1 año
3 clima templado sobre morrena		90 cm	16.000
3 material removido por el hombre		5 cm	100
3 duna arena		17,5 a 25,0 cm	100 años después de que la duna se paró
3 morrenas carbonadas	de 157 a 13.440	1 cm	10 a 857
3 rocas expuestas artificialmente	6.272 a 13.440		1 año
3 rocas sin disturbio	< 1.000		1 año
depósitos periglaciales sobre 3.000 m. Simen, Etiopia			5.000-10.000
a) horizonte A		70 cm	
b) horizonte B		20-30 cm	
suelos entre 3.000-3.400 m Simen, Etiopia	2000		1 año
barbechos entre 1000-2000 m Mae Muang Luang, Tailandia	de 100.000 a 120.000		10

TABLA II.5 : continuación

5	tasa media sinlor no calcáreos:	300 a	
	Gran Bretaña	1300	1 año
6	tasa media E.E.U.U.	< 500	1 año

1: Total, 1964

2: Chamberlin, 1909

3: Ichikō & Bertrand, 1959

4: Hurni, 1983

5: Fullen, 1985

6: Mannering, 1981

TABLA II-6 : PERDIDAS POR EROSION

autor	SITIO	t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	grosor de capa perdida
	límite entre erosión 1 benigna y maligna (erosión compensable)	0,75	0,5 cm.año ⁻¹
	2 ves. natural E.E.U.U.	0,25 a 1,48	
	3 media anual de erosión tolerable en laderas cultivadas E.E.U.U.	2 a 11	
	4 erosión tolerable media anual, suelos arados Gran Bretaña	> 2	
	5 zonas templadas (erosión compensable) rocas duras rocas blandas	< 0,25 < 1,5	
	6 erosión neta actual pendientes >10% cultivadas anualmente, por debajo de 1.000 m, Simen, Etiopía	20	
	7 erosión tolerable Simen, Etiopía a) < 1.000 m depósitos periglaciales arenizas volcánicas sobre basaltos b) < 1.000 m	0,1 a 0,4 2 2	
	8 cultivos intensivos de corta duración Ban Muang Luang, Tailandia	120	
	9 media anual suelo arcillo arenoso Bedfordshire, Gran Bretaña	10,8	
	10 media anual suelo arcillo-arenoso diferentes pendientes Shropshire, Gran Bretaña	4,9 a 87,6	

Tabla II A : continuación

8	media anual	
	suelo arcillo-arenoso	103
	Hechaie, Bélgica	

1: Zachar, 1902

2: Smith & Stamey, 1965

3: Burni, 1983

4: Fullen, 1985

5: datos tomados por Zachar (1982) de: Bennett (1939, 1955, 1958); Kohnke & Bertrand (1959); Smith & Stamey (1965)

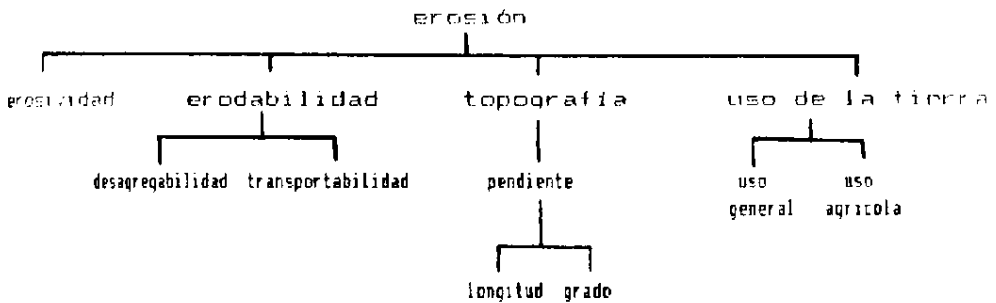
6: Morgan, 1980

7: Fullen & Reed, 1986

8: Bellinno, 1978

2.2. Erosión hídrica

La erosión hídrica es aquella en la que el agua es el agente erosivo. En nuestro caso, estamos especialmente interesados en la erosión causada por el agua de lluvia y drenaje de la misma. Los factores que la afectan pueden resumirse de la siguiente manera (Hudson, 1979):



donde:

1) **erosividad:** es la capacidad del agua de lluvia de erosionar.

2) **erodabilidad:** es la vulnerabilidad del suelo a ser erosionado.

3) **topografía:** importa la existencia de pendientes, así como su longitud, grado y forma.

4) **uso de la tierra:** incluye todos los factores controlados o modificados por el hombre, su tipo y magnitud.

A continuación trataremos más en detalle los términos erosividad y erodabilidad.

Erosividad:

Se tiene claro desde hace mucho que no todas las lluvias tienen el mismo efecto erosivo y esas diferencias se han relacionado con dos de sus características: intensidad del evento

y energía cinética de las gotas. Según Lal (1979) el impacto individual de cada gota produce la fuerza que causa la desagregación de las partículas del suelo superficial dejándolas libres para ser arrastradas por la escorrentía. Varias expresiones matemáticas han sido desarrolladas intentando encontrar la relación entre la energía cinética implicada en una lluvia y la intensidad de la misma, el tamaño y número de gotas y la velocidad final que ellas alcanzan (la tabla II-7 muestra estas relaciones).

En base a esas características de la lluvia, se han propuesto varios índices para estimar la erosividad, de los cuales describiremos los más importantes (Hudson, 1979; Lal, 1979; Rondón et al., 1986; Velasquez, 1986):

1) EI_{30} : propuesto por Wischmeier & Smith (1960) y ajustado por Wischmeier (1964)

Durante la década del 50, Wischmeier siguió una serie de investigaciones que mostraron: a) que una combinación de energía de precipitación y cantidad de agua caída podía tener una buena correlación con la erosión y b) que no hay buena correlación entre la pérdida de suelo y la cantidad de agua en tormentas individuales ni en eventos máximos de 5, 15 o 30 minutos. Posteriormente probó que se obtiene una buena correlación cuando se hace el producto entre la energía cinética de una tormenta (E_c) y la intensidad máxima en 30 min (I_{30}); así se definió el índice EI_{30} :

$$EI_{30} = E_c \cdot 2 \cdot I_{30} / 100$$

TABLA II-7: Energía cinética de lluvias de diferentes intensidades en relación con el diámetro medio y la concentración de las gotas (Lull, 1959)

lluvia	intensidad cm/hora	diámetro medio mm	velocidad de caída m/seg	número de gotas m ⁻² /seg	energía cinética w/m ²
niebla	0,013	0,01	0,003	67×10 ⁶	1,6×10 ⁻¹⁰
garúa	0,5	0,10	0,021	27×10 ³	3,3×10 ⁻⁹
lluvia fina	0,025	0,96	4,1	150	6,1×10 ⁻⁴
lluvia fina	0,10	1,24	4,8	280	3,3×10 ⁻³
ll.moderada	0,38	1,60	5,7	495	1,7×10 ⁻²
ll. fuerte	1,5	2,05	6,7	495	9,4×10 ⁻²
ll.muy fuerte	4,1	2,40	7,3	820	8,9×10 ⁻¹
	10	2,85	7,9	1214	9,2×10 ⁻¹
	10	4,00	8,9	440	1,1
	10	6,00	9,3	130	1,2

R, que es un factor de erosividad para cada localidad o condición estudiada, es la sumatoria de los EI_{30} calculados para cada tormenta.

2) KEI_1 : propuesto por Hudson (1971,1976)

En experimentos realizados en Rodesia, Hudson mostró: a) que la energía cinética de las tormentas con una intensidad mayor de 25 mm/h tiene una correlación mejor con la pérdida de suelo que la mostrada por EI_{30} y b) que las precipitaciones con intensidad menor de 25 mm/hora no tienen capacidad erosiva.

3) AIn : propuesto por Lal (1976)

Al igual que Hudson, Lal encontró que en ambientes tropicales el índice EI_{30} no tiene la buena correlación con la pérdida de suelo que Wischmeier encontró en las zonas templadas. En 1976 propuso el siguiente índice:

$$AIn = \sum_1^{12} \left(\sum_1^n (ai_i) \right)$$

donde a es lo caído en cada evento en cm, i_i es la mayor intensidad de ese evento en cm/hora y n es el número de días con lluvias en el mes. Lal encontró que este índice se correlaciona mejor que los dos anteriores con tanto el escurrimiento como con la pérdida de suelo (ver TABLA II-B).

4) p^2/F : propuesto por Fournier (1956) y Fournier & Henin (1959)

Este índice plantea una relación a otra escala de trabajo ya que surgió del análisis del arrastre de sedimentos por más de 140 ríos de Europa, Asia y E.E.U.U.. Se definió el siguiente

TABLA II-8 : Coeficiente de correlación (r) entre índices de erosividad y escorrentia y pérdida de suelo (Lal, 1979)		
índice	escorrentia	pérdida suelo
KE > 1	0,81	0,64
EI30	0,85	0,65
Aia	0,91	0,80

TABLA II-9 : Capacidad y tasa de infiltración en Iwo y Oba en suelos con arbustal y después de uno y dos años de cultivo de maíz (Wilkinson & Ania, 1976)				
	Iwo		Oba	
	capacidad cm/h	tasa cm/h	capacidad cm/h	tasa cm/h
arbustal	118,9	21,1	107,7	25,4
1 año cult. maíz	44,7	20,5	48,8	25,1
2 años cult. maíz	49,5	22,4	21,6	9,1

"coeficiente de precipitación":

$$C = p^2 / P$$

donde p es la precipitación media del mes más lluvioso y P es la media anual de precipitación, se encontró una alta correlación entre este coeficiente y D (en t/km^2) que es la "degradación específica" de la cuenca de un río y se calcula:

$$D = a C + b$$

donde a y b son constantes que dependen a su vez del coeficiente morfológico U , que se calcula:

$$U = \bar{H} / S$$

donde \bar{H} es la altura media de la cuenca sobre el nivel base y S es la proyección de la superficie.

Según Lal (1979) este índice funciona mejor para zonas tropicales que para templadas, y en áreas con pendientes fuertes mejor que con suaves. Tiene la dificultad de que al tratarse de cuencas implica una multiplicidad de usos y condiciones diferentes. A pesar de sus limitaciones, es ampliamente utilizado en estudios regionales por Organismos Estatales (por ejemplo, CENICAFE en Colombia, MARNR en Venezuela).

Erodabilidad:

Entre las características del suelo más importantes por su importancia en los procesos erosivos está la estructura. La existencia de agregados difíciles de romper juega el doble papel de a) aumentar la infiltración y en consecuencia disminuir la escorrentía, de modo que el agua erosionante disminuye y b) luchar contra el efecto disgregador de las gotas de agua y en

consecuencia disminuir la fracción mineral arrastrable. Como corolario podemos decir que un suelo poroso con buena infiltración es poco susceptible a la erosión.

El análisis de la estructura y de la infiltración es por lo tanto muy importante en los estudios sobre causas de erosión. Según Greenland (1979), la infiltración en los suelos tropicales se encuentran entre 100 cm/hora y 10 cm/hora, lo cual está muy por encima de la mayoría de los templados. Los datos de la TABLA II-9 de Wilkinson & Onia (1976), de suelos arenosos con no más de 10% de arcilla, muestran los altos niveles de infiltración bajo vegetación natural y su drástica disminución por alteración antrópica de su horizonte superficial. En el mismo sentido, son ilustrativos los datos de Trowse & Bayer (1965) para un latosol húmico con un cultivo de caña de azúcar, en el cual calcularon una infiltración de 8 cm/hora mientras no había movimiento de gente en el cultivo y 2 cm/hora después de ser compactado en superficie por las actividades de cosecha. Fullen & Reed (1987) analizaron las consecuencias del paso de un tractor sobre terreno agrícola y encontraron una disminución impresionante de la capacidad de infiltración por el cambio en la estructura del horizonte superficial (Figura II-4).

Sin embargo, los estudios relacionados con las fuerzas de *cohesión* de las partículas y la cuantificación de la estructura, en especial de las características de los espacios porosos, no han permitido aún llegar a reglas universales (Hudson, 1979; Greenland, 1979). A pesar de esto, el Soil Conservation Service del US Department of Agriculture ha llegado a tabular valores de

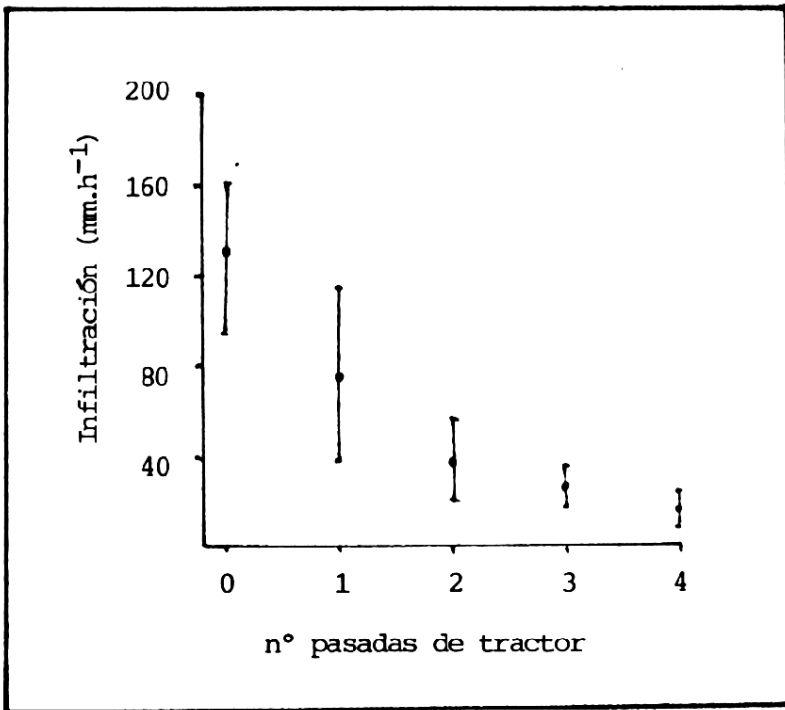


FIGURA 11-4: Capacidad de infiltración ($\pm 1DS$, $N=50$)
 Vs n° de pasadas de un tractor.
 Tomado de Fullen & Reed, 1987

probabilidad para más de veinte tipos de suelos, con extrapolaciones a cientos de series, tomando como base muy pocos valores realmente medidos (Wischmeier & Smith, 1960).

La erosión hídrica laminar, la que ocurre por arrastre superficial de material en el proceso de escorrenría, es la que nos interesa tratar ya que es el tipo de erosión que notamos en los agroecosistemas cafetaleros en los que trabajamos. Zachar (1981) presenta una clasificación de este tipo de erosión de acuerdo con la magnitud de daño que produce y que nos parece muy interesante al menos para ubicarnos rápidamente dentro de los rangos de importancia dada una cierta pérdida, por ello la incluimos a continuación.

capa removida mm.ha ⁻¹ .año ⁻¹	magnitud de la erosión
< 0,05	erosión insignificante o inexistente
0,05-0,5	erosión suave
0,5-1,5	erosión moderada
1,5-5	erosión fuerte
5-20	erosión muy fuerte
> 20	erosión catastrófica

La primera categoría puede considerarse como benigna y la segunda coincide con la mayor parte de erosión tolerable. En suelos no muy delgados donde la remoción selectiva no sea muy importante, estos tipos de erosión prácticamente no afectan. Se estima que las pérdidas sean de 20 cm en 400 años y que los nutrientes arrastrados son mínimos comparados con los tomados por la vegetación de modo que pueden ser fácilmente repuestos con fertilizantes.

Cuando la erosión es moderada se estima que los nutrientes perdidos anualmente son equivalentes a los tomados por la vegetación, lo que significa que debe aplicarse el doble de fertilizantes que en el caso anterior para no disminuir la fertilidad. Los nutrientes inaccesibles que formarían la base del suelo en formación son eliminados constantemente. En este caso, las tasas de pérdida son de 20 cm por 133 a 400 años.

Con erosión fuerte la pérdida del horizonte húmico ocurre durante una generación (humana) es decir que 20 cm se pierden entre 40 a 133 años. La pérdida de nutrientes es mucho mayor que la tomada por la vegetación y el reemplazo por fertilizantes es muy parcial.

La erosión muy fuerte ocasiona la pérdida de los primeros 20 cm en 10 a 40 años, al menos que se acelere por fuertes tormentas. En los casos en que la remoción de 20 cm puede ocurrir en una o pocas fuertes tormentas se considera una situación catastrófica.

2.3. Métodos de estudio:

El análisis de erosión depende de los objetivos de cada estudio, pero en líneas generales podemos separarlos en dos grupos:

a) los estudios de erosividad y erodabilidad

b) los estudios de degradación del suelo

Ellos son excluyentes ni incompatibles, por el contrario son complementarios pero tienen metodologías propias.

2.3.1. Los estudios de erosividad y erodabilidad:

Por la misma definición de los términos se trata de estudios que se prestan a la experimentación tanto en laboratorio como en el campo bajo condiciones muy controladas donde se mide con sumo cuidado características de las precipitaciones y del horizonte superficial del suelo.

En el caso de las precipitaciones, distintos autores hacen medidas de parámetros diferentes dependiendo de cuales características consideren más importantes para el proceso erosivo: número de gotas/tiempo en distintos eventos, distribución de tamaños de gotas, velocidad final de las gotas dependiendo de su tamaño. Todo esto con el fin de lograr una medida de la energía cinética implicada en precipitaciones de distinta intensidad y frecuencia, bajo el supuesto que la energía cinética es el factor más importante a considerar. Esto último también se ha sometido a prueba.

Claro que estas medidas no tienen sentido si se hacen aisladamente sino que deben ir acompañadas del efecto que producen sobre la pérdida de suelo. Para ello se somete un mismo suelo a distintos tipos de lluvia artificial a la cual se controlan los parámetros mencionados.

El resultado de estos experimentos es una serie de medidas de parámetros de lluvia correlacionados con medidas de pérdida de suelo. Con estos valores se han elaborado fórmulas empíricas, de las cuales presentamos las más usadas en el punto 2.2., pero no

podemos hablar aún de fórmulas verdaderamente universales.

El horizonte superficial, que es el que sufre el proceso erosivo, posee características que lo hacen más o menos susceptible de ser erosionado. De los diversos parámetros que se han estudiado para determinar el más relacionado con la erosión, la estructura ha resultado el más importante. De modo que los experimentos implican un análisis de las características de los agregados, su número/volumen, su cohesión, su tamaño.

2.3.2. Los estudios de degradación del suelo:

Aparte de los trabajos tendientes a conocer el comportamiento de la erosión de los suelos frente a distintas condiciones de precipitación y de manejo, existe una preocupación por elaborar modelos más generales que combinen distintos factores que influyen en los procesos erosivos.

En 1960, Wischmeier & Smith presentaron un modelo cuyo objetivo es predecir las pérdidas por erosión hídrica basado en las características del suelo, de las lluvias, de las parcelas de erosión y de la vegetación y su manejo agrícola. El resultado de la combinación de seis factores que los autores consideraron claves es una ecuación que se conoce con el nombre de Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), la cual ha sido considerada en múltiples trabajos (Paez, 1985; Roose, 1981; Lal, 1979b; Moldenhauer & Onstad, 1979; El-Swaify, 1979). Su expresión original es como sigue:

$$A = R . K . L . S . C . P$$

donde: A representa la pérdida promedio de suelo para el lapso de tiempo considerado en R
R es una medida de la fuerza erosiva de la lluvia y la escorrentía
K es una medida de la erodabilidad del suelo
L es la longitud de la pendiente
S representa la pendiente
C está relacionado con el cultivo y su forma de manejo
P representa el efecto de las prácticas de control de erosión

Desafortunadamente, los requerimientos de datos para aplicar esta ecuación no son triviales y hay que planificar trabajos completos para conseguirlos, lo que hace que a veces se empleen datos supuestos. De todos modos, ha servido y sigue sirviendo de guía sobre información a recolectar en los trabajos de erosión para llegar a realizar predicciones.

Un ejemplo de su aplicación en Los Andes venezolanos lo constituye el trabajo de Velasquez (1986) para la cuenca alta del río Boconó.

Otro enfoque dentro de los trabajos integradores sobre problemas erosivos es el que contempla la importancia de la erosión más que su monto absoluto. Hurni (1983) ha aplicado este enfoque en investigaciones en Ethiopia y en Thailandia del Norte, basándose en que los efectos desestabilizadores de la erosión para un sistema no pueden conocerse sólo con estudios de cantidad de material removido sino que requieren del conocimiento de las tasas de formación de suelo y poder así establecer balances.

En esos estudios, en llamó tasa de degradación del suelo (D) a la relación:

$$D = A / T$$

Donde A es la pérdida media de suelo ($t \cdot ha^{-1}$) en un tiempo dado y T es la erosión tolerable ($t \cdot ha^{-1}$) en el mismo tiempo.

La pérdida real (A) es cuantificable, por ejemplo con perfiles de erosión, pero la pérdida tolerable (T, aquella que puede ser recuperada por pedogénesis) requiere de un análisis de las tasas de formación de cada horizonte. Cuando esas tasas son cuantificables se puede establecer la relación indicada en la figura II-5, y tener así valores concretos de D. Cuando esto no es posible, debe recurrirse a indicadores secundarios.

Este tipo de análisis ha permitido entender como en Simen, Ethiopia, con tasa promedio de pérdida de suelo de $20 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ que para el área en cuestión es una tasa baja, sin embargo los agroecosistemas son inestables debido a que las tasas de formación son aun más bajas: entre 2 y 6 $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, dependiendo de la altura. Por el contrario, en Huai Ihung Choa, Thailandia del Norte, las tasas de pérdida de suelo se calcularon de 108 a 152 $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ sin embargo los agroecosistemas no parecen ser inestables, la explicación a esto es muy interesante: las tasas reales de formación de suelo no pueden explicar una reposición del material en términos de un año (10 a $12 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) pero sucede que las prácticas agrícolas locales contemplan un año de cultivo y 10 años de descanso, y es así como al cabo de 10 años, cuando ese cultivo de arroz en montaña tan erosivo vuelve a realizarse en la misma parcela, ésta ha recuperado naturalmente la cantidad de suelo perdido. Este par de ejemplos son muy ilustrativos sobre el cuidado que hay que tener cuando se manejan

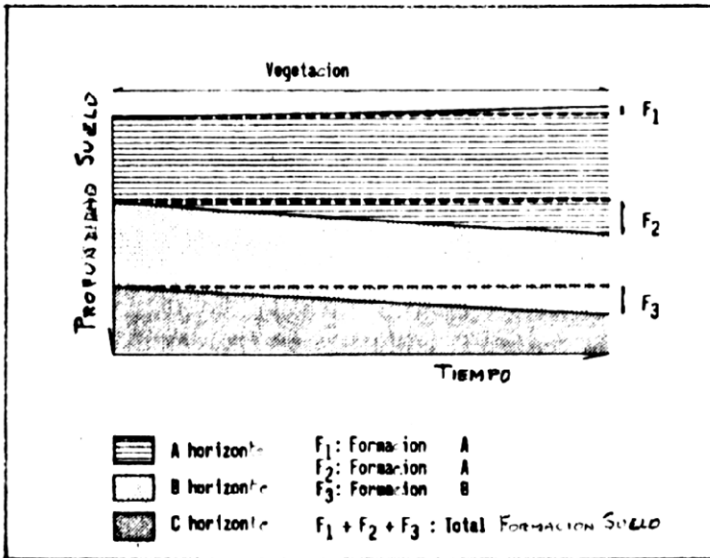


FIGURA II-5: Diagrama de profundidad del suelo y su formación en función del tiempo. F_1 , F_2 y F_3 = tasas de formación.

F_1 : comprende todos los procesos de acumulación en la superficie del suelo.

F_2 : incluye todos los procesos de formación en el Horizonte A.

F_3 : resultado de meteorización del material parental subyacente.

Tomado de Humi, 1983

añas sobre cantidad de pérdida de suelo, so pena de incurrir en errores de pronóstico.

PARTE II

III. FUNDAMENTACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

1. FUNDAMENTACION

Desde que a mediados del siglo pasado comenzó en toda la zona andina venezolana un nuevo ciclo económico debido al auge del café, este producto se ha mantenido como uno de los más importantes y representativos de nuestros Andes.

El cultivo del café en Los Andes ha ido más allá del simple manejo de los cafetos, de hecho ha marcado pautas en la economía y sociedad regional, así como en las consecuencias ambientales de su manejo. El ritmo de su ciclo reproductivo, el proceso de elaboración del producto y la cantidad de cultivos de frutales que pueden desarrollarse paralelamente sobre el mismo terreno impone un cierto ritmo de vida a la estructura familiar y capacidad de autosuficiencia que le son características. Esta forma de cultivo tradicional se realiza con variedades que crecen obligatoriamente bajo sombra como un elemento de sotobosque, por lo cual los cafetales comprenden, además de los cafetos, una serie de árboles que forman un dosel abierto entre los cuales pueden encontrarse frutales, pero con mayor frecuencia los agricultores han seleccionado varias especies de la selva original que proporcionan la sombra más adecuada. En consecuencia, el cafetal tradicional conserva características fisiológicas y florísticas de la vegetación natural, no requiere insumos y no tiene exigencias respecto a la pendiente del terreno ni al tratamiento de la tierra.

Recientemente, con la motivación de lograr una mayor producción en términos de Kg/Ha, el Fondo Nacional para el cultivo del café (FONCAFE) está llevando a cabo una campaña que propone el cambio de las variedades llamadas típicas por variedades brasileñas de mayor productividad. Estas nuevas variedades han sido seleccionadas para crecer sin sombra, pero en terrenos planos y con suministro de insumos. En nuestros Andes los terrenos planos se destinan, preferentemente, a distintos tipos de cultivos anuales, mientras los cafetales han quedado relegados a las laderas ubicadas entre los 800 y 1700 msnm, con precipitaciones entre 900 y 1500 mm.

La campaña de creación de cafetales de sol en laderas en los Andes del Sur del Estado Mérida es un hecho y las plantaciones de este tipo van en aumento con importantes consecuencias sociales, culturales, económicas y ecológicas en las comunidades locales. Es hora de que dichas consecuencias sean evaluadas en base a estudios que, de manera cuantitativa y rigurosa, proporcionen resultados comparables sobre la dinámica de estos agroecosistemas. En lo que a este proyecto concierne, proponemos el estudio de algunos aspectos álgidos en las discusiones sobre el tratamiento de cafetales: 1) ¿cómo se afecta la economía hídrica del sistema? 2) ¿cómo se afecta la economía de nutrientes al cambiar la vegetación y las condiciones hídricas? ¿qué papel juega el aporte de materia orgánica del dosel?, 3) ¿cómo se afecta la erosión de laderas? ¿cuáles son las tasas de pérdida de fracción mineral del suelo, nutrientes y materia orgánica?.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Este proyecto queda enmarcado dentro de otro mucho más vasto y multidisciplinario:

ESTUDIO INTEGRADO DE LOS AGROECOSISTEMAS CAFETALEROS EN LOS PISOS DEL SUR DE MERIDA (ANDES VENEZOLANOS),

dirigido por la Dra. Maximina Monasterio de la Facultad de Ciencias de la U.L.A., cuyo objetivo general es el de analizar y describir la estructura, dinámica y limitantes socioeconómicos de los agroecosistemas cafetaleros de montañas tropicales, dado que estos se encuentran en ambientes de gran fragilidad, donde el conocimiento de la ecología puede generar conocimientos para elaborar políticas de manejo racional del ambiente de montaña sustentando una producción social sostenida que incremente el bienestar del campesinado. Las hipótesis centrales de ese proyecto son:

1. En las montañas tropicales, las modalidades de uso de la tierra predominantes en cada piso altitudinal representan sistemas económicamente viables tendientes a asegurar el sostenimiento de la familia campesina en lo inmediato y a minimizar los riesgos a corto plazo, manteniendo un cierto equilibrio natural que impide la degradación del ambiente y de los ecosistemas.

2. La conversión del sistema productivo tradicional en formas más productivas, como alternativa a la extensificación,

implica en primer término un cambio en los rubros cultivados o en las variedades utilizadas. Cuando no se adaptan a la realidad existente, estos cambios tecnológicos acarrearán consecuencias negativas desde el punto de vista ecológico y de la organización social.

3. Los cafetales bajo manejo de sombra, los cuales conservan algunas características del bosque natural, mostrarán mayor equilibrio en el balance hídrico y en el flujo y reciclaje de nutrientes y materia orgánica, lo que derivará en mayor estabilidad del sistema. Esto es fundamental considerando las condiciones de gran fragilidad de las laderas con fuertes pendientes donde se asienta la mayoría de los cafetales en Los Andes venezolanos.

Por otra parte, este tipo de manejo tradicional permite una gran diversidad de especies de árboles (frutales) asociados al café que brinda al campesino mayores fuentes alimentarias, así como menor demanda de insumos y mano de obra, lo que da a este tipo de producción una mayor autonomía.

Por el contrario, los cafetales de sol podrán tener mayor producción pero dependerán de mayores aportes externos (riego y fertilizantes) para mantener el equilibrio del agroecosistema y una producción sostenida.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

En esta primera etapa del proyecto general, hemos querido analizar algunos elementos del balance hídrico, balance de

fuentes y erosión que contribuyan a un primer análisis global agroecosistema cafetalero, intentando una aproximación eliminar de las consecuencias ecológicas de este tipo de uso de tierra sobre todo en función de la estabilidad de las laderas, es decir, de garantizar una permanencia rentable del sistema de producción. Este análisis global nos lo hemos planteado no solo para la forma tradicional de manejo sino para la nueva forma de manejo que seguramente será dominante en un futuro cercano.

Intentar un análisis global nos obliga a estudiar eamente procesos que si bien están ligados son bien sistematizables. Cada uno tiene su propia metodología, su propio tratamiento de resultados y requiere para su interpretación de un marco teórico distinto que ha alcanzado grados diferentes de profundidad. Estamos conscientes de las dificultades y limitaciones que tiene el abordar varios problemas a la vez, pero todo en lo referente a la profundidad con que cada uno de ellos puede ser tratado, pero estamos convencidos que las aproximaciones globales que esto permite tienen la ventaja de 1) dar una primera visión sobre el problema general y 2) de señalar los puntos claves que vale la pena profundizar al menos en una segunda etapa, con la cual se llegará a la formulación de propuestas concretas para las políticas de manejo de las áreas cafetaleras.

Hemos planteado, pues, realizar estudios a gran escala (de finca) que permitan analizar la estructura y dinámica de los dos principales tipos de manejo del café en ladera de los Andes venezolanos (cafetales de sombra y cafetales de

así como comparar las consecuencias ecológicas de cada

Estos estudios comprenden:

a) elementos del balance hídrico de los dos tipos de ecosistemas cafetaleros: en especial entradas de agua al ma y salidas superficiales

b) pérdidas de la fracción mineral del suelo por erosión ca; análisis preliminar de este proceso

d) variación del contenido de nutrientes en los fertilizantes aéreos usados para el balance hídrico y drenaje superficial (los indicados en punto a)).

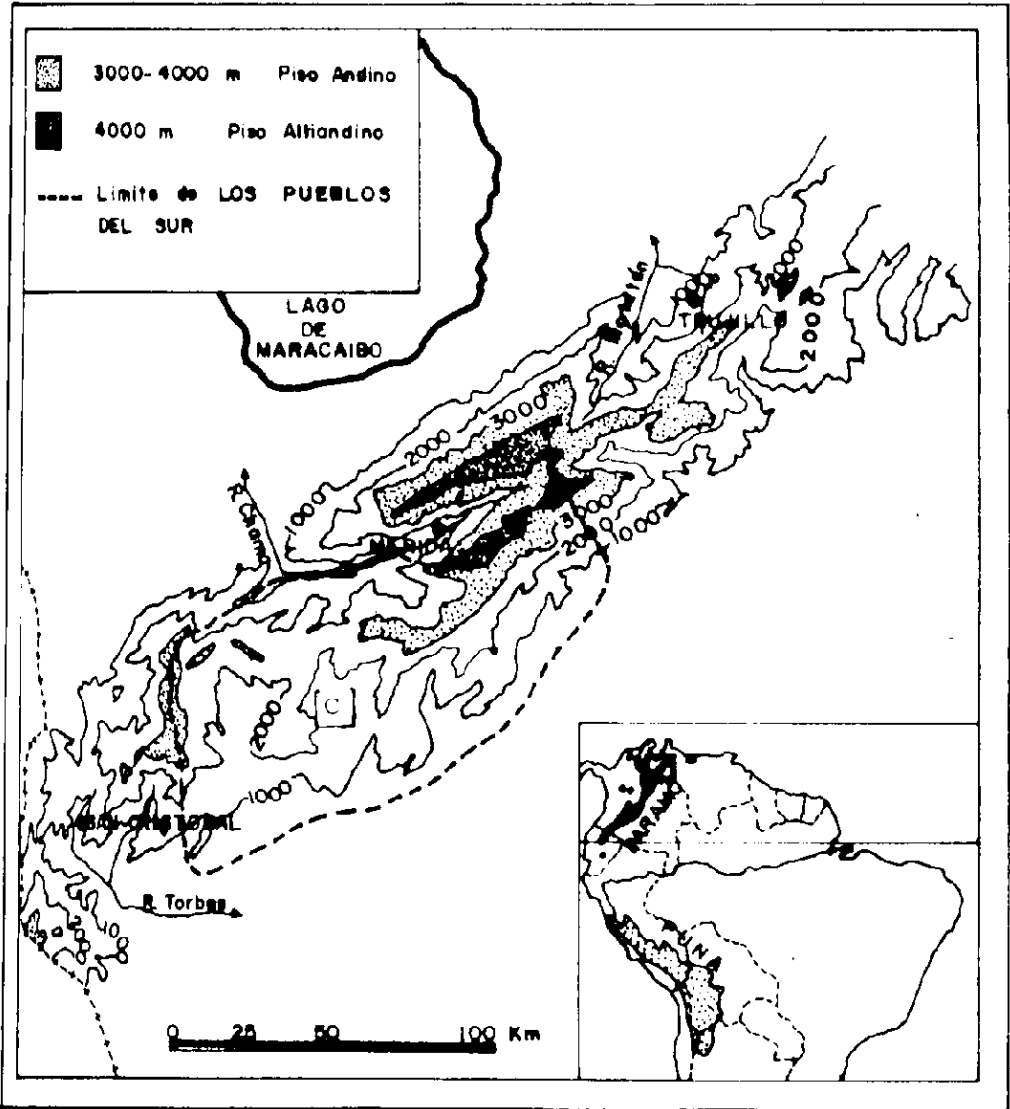


FIGURA IV- 1 : Ubicación de la zona de trabajo, C = Canaguá .

fue seleccionado la finca del Sr. Tomás Antonio Mora (Figuras IV-1 y IV-2) como la más apropiada por las características físicas de sus cafetales y por la buena y generosa disposición que han mostrado el Sr Mora y su familia.

2. Características generales y físicas:

La finca está ubicada a 1.700 m de altitud, en las laderas de la margen izquierda del río Canaguá, en el sector Río Arriba (Figura IV-2). Presenta, entre otros, dos cafetales contiguos uno de sol y otro de sombra que se encuentran a pocos metros de distancia (aprox. 50m) en la misma cota, con la misma pendiente y sobre el mismo sustrato: Formación Mucuchachí. Esta formación, de amplia distribución en Los Andes venezolanos, se compone básicamente de esquistos, filitas y areniscas ligeramente metamorfiadas intercaladas en la serie de filitas, correspondientes al Carbonífero-Pérmico.

2.1. Los suelos

Los suelos de estos cafetales son umbricos, correspondiendo a un humitropept franco esquelético, cuyas características se presentan en la TABLA IV-1.

Con miras a realizar medidas en los niveles de mayor sustracción desde el punto de vista de la distribución espacial de la vegetación de los cafetales, subdividimos el horizonte A en tres niveles (ver capítulo V, punto 2). A continuación mostramos los resultados del análisis de densidad

TABLA IV-1 : características del suelo

CAFETAL DE SOMERA:

horizonte	profundidad cm	% volumen	color (Munsell)	estructura	consistencia seco hum. moj.	raíces
Ah1	0 - 7	29	10YR2,5/2	granular fuerte	S MF LA/Lp	abundante
Ah2	7 - 20	45	10YR 3/2	granular sedio	S MF LA/Lp	abundante
Ah3	20 - 40	70	10YR3,5/4	blocoso subangular sedio	S F LA/Lp	medio
C1	40 - 65	75	10YR3,5/5	blocoso subangular debil	S F LA/Lp	poco
C2	65 - *	80	10YR 4/6	blocoso subangular debil	S F LA/Lp	muy poco

* : dada la dificultad en seguir cavando la profundidad máxima fue 85 cm

CAFETAL DE SOL:

horizonte	profundidad cm	% volumen	color (Munsell)	estructura	consistencia seco hum. moj.	raíces
Ah1	0 - 9	10	10YR 2/2	granular fuerte	S MF LA/Lp	abundante
Ah2	9 - 27	20	10YR 3/2	blocoso subangular sedio	S MF LA/Lp	abundante
Ah3	27 - 51	35	10YR 3/4	"	S F LA/Lp	medio
BC3	51 - *	50	10YR3,5/6	"	S F LA/Lp	muy poco

agente (D.A., ver metodología), en el cual nos basamos para hacer los cálculos de equivalencia de contenido de agua a mm de precipitación.

estrato cm	cafetal de sombra		cafetal de sol	
	D.A. g/cm ³	volumen cm ³ /m ²	D.A. g/cm ³	volumen cm ³ /m ²
0-10	0,88	50103,78	0,91	35788,42
10-20	1,15	30062,27	0,80	33641,11
20-30	0,87	24014,03	0,93	33641,11

2.2. Clima

El climadiagrama de la Figura IV-3 resume el clima de la estación más cercana a los cafetales estudiados, situada 170 m distante que estos (Molina et al, 1984).

Se trata un régimen biestacional bien marcado, con un período seco de cuatro meses de diciembre a marzo y otro lluvioso de abril a noviembre, con una media anual de temperatura de 18,5 °C.

En los cafetales bajo estudio hemos medido la precipitación desde el inicio del trabajo pero no presentaremos aquí los resultados ya que ellos son objeto del capítulo VI-1.

En cada cafetal instalamos un termohigrógrafo cuyos registros nos permiten distinguir como estos factores climáticos son afectados por las condiciones de cada sitio. La Figura IV-4 muestra los valores de humedad relativa y temperatura dentro de

CANAGUA (1.560 m)

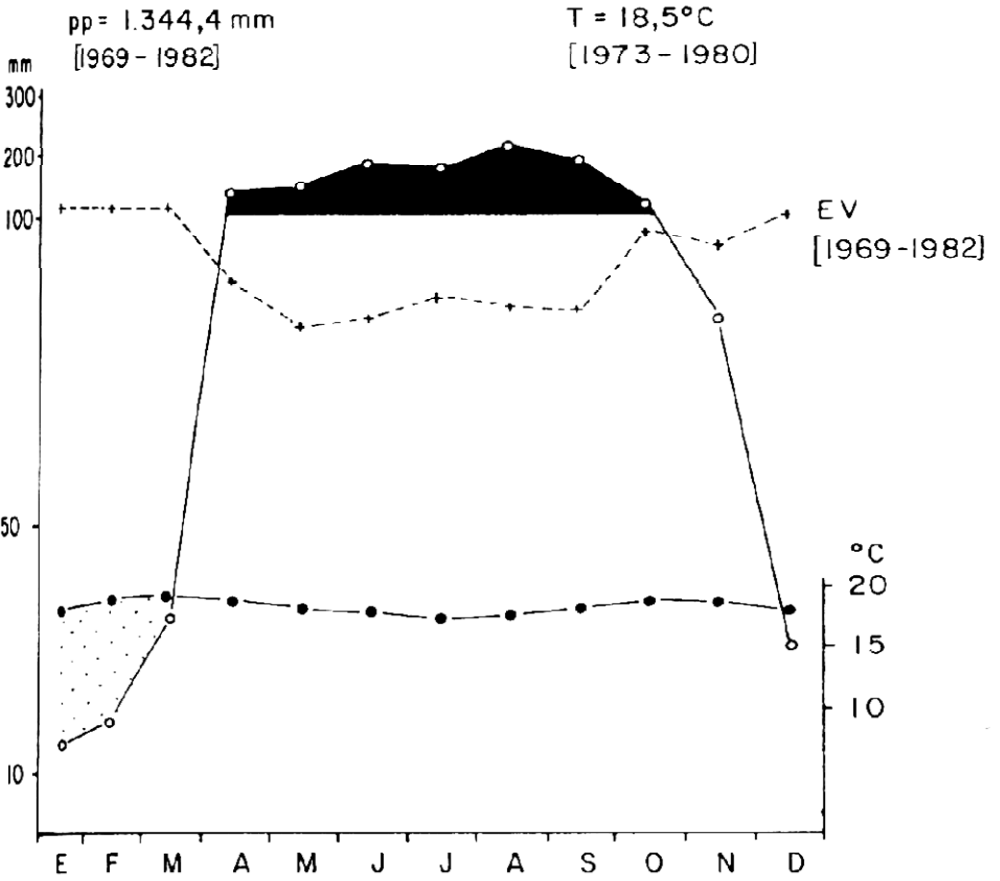


FIGURA VI-3: Climadiagrama tipo Gausen de la estación Canaguá
 Línea punteada: Evaporación, Tina A.

del cafetal, a 30 cm del suelo dentro de una garita meteorológica. Para ambos parámetros, se consideró la media de los 4 o 5 días siguientes a cada muestreo y promediando luego los valores correspondientes a un mismo mes. La diferencia en temperatura es notable durante todo el año estando la del cafetal de sol entre uno y dos grados por encima del de sombra. La humedad relativa varia poco durante la época seca aumentando la humedad a medida que se adentra en la época lluviosa.

3. Estructura y distribución de la vegetación:

3.1. Cafetal de sol:

La vegetación es, naturalmente, distinta en ambos cafetales: el cafetal de sol tiene arbustos de *Coffea arabica* var. *bourbon* y *starna* (Figura IV-5) además de una escasa cobertura de juncos y helechos, así como restos muertos de árboles que crecieron allí anteriormente. Esta plantación se hizo en 1983 y está en su tercera cosecha importante.

Esta variedad se siembra más espaciada que las que requieren para ser el propósito de que reciban buena insolación por todo el follaje. En nuestro caso la densidad es de 0,31 planta/m². Es preciso aclarar que llamamos "planta" a cada unidad sobre el terreno pero en realidad se trata de dos individuos creciendo juntos (en promedio, ya que a veces son tres o uno solo); esto es, la forma de plantado según la cual se colocan juntas las plantas.

Los arbustos son de porte pequeño, no más de 2 m. de follaje



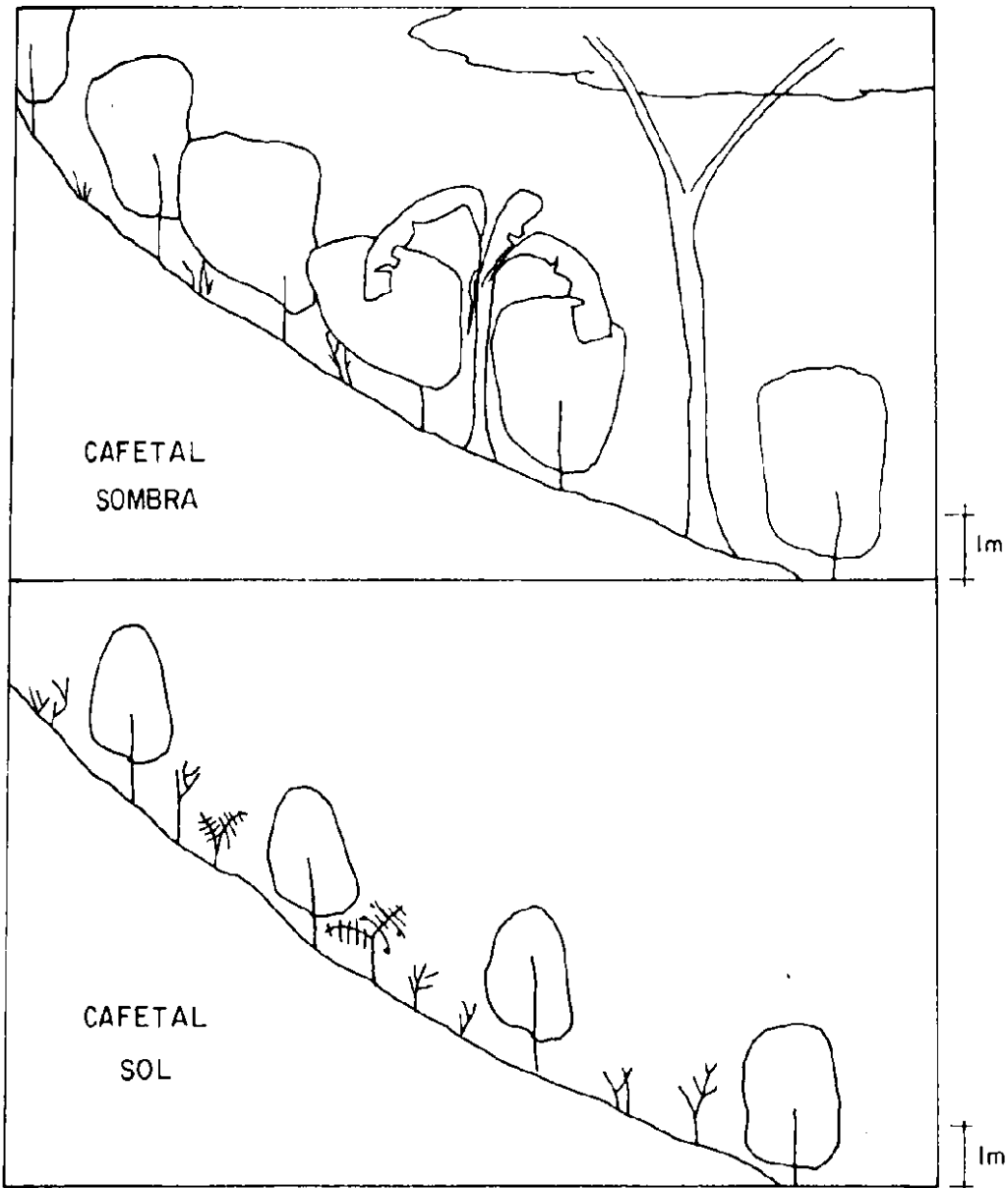


FIGURA IV - 6: Estructura y fisonomía de los cafetales de sol y sombra.

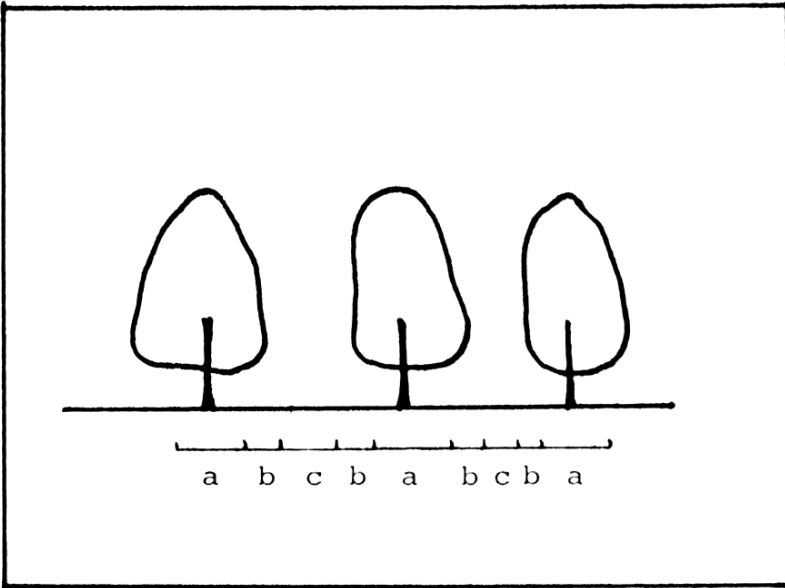


FIGURA IV-7 : microambientes del cafetal

- a : bajo cafeto
- b : borde cafeto
- c : sin cobertura

mas / ramas cortas con gran cantidad de yemas florales. Su copa es casi un círculo, en promedio su eje mayor y menor son $1,4 \times 1,5$ m es decir que su cobertura es de unos $1,65$ m². Su estructura bastante simétrica y su distribución regular hacen que este tipo de cafetal tenga poca heterogeneidad.

El diagrama de la Figura IV-6 muestra la estructura de este tipo de cafetal. Podemos separar tres ambientes diferentes (Figuras IV-7) y en la siguiente relación indicamos a continuación:

bajo cafeto:	37 % de la superficie
borde cafeto:	23 % de la superficie
cielo abierto:	40 % de la superficie

Esta relación de coberturas se obtuvo a partir de un mapeo detallado de copas de los cafetos existentes en un área de 100 m² (31 cafetos).

3.2. Cafetal de sombra:

El cafetal de sombra tiene plantas de *Coffea arabica* var. *marica* (Figura IV-8), sombreadas por el follaje de *Inga* *sp.* (Figura IV-9). El café tiene entre 13 y 16 años de edad.

Esta variedad es de porte mucho mayor que la anterior, con ramas largas que no se sostienen bien, doblándose hacia algún lado y en consecuencia la copa de un arbusto se mezcla con la de otro. En general alcanzan unos 3 a 4 m y se mantienen así porque ya que pudieran crecer más. Sus ramas son horizontales y de follaje poco denso, su proyección al suelo es



FIGURA IV-8: *Coffea arabica* var. *arabica*

El bosque con ejes en promedio $2,4 \times 1,7 \text{ m}^2$ es decir que su proyección sobre el suelo es de unos $3,2 \text{ m}^2$. Los individuos se sitúan de a pares como se explicó para la variedad de sol. Los ramos están más cercanos entre sí que en el otro cafetal, con una densidad de $0,43 \text{ plantas/m}^2$. Los árboles sombreantes están a una distancia aproximada de entre 15 y 20 m, y su copa tiene un diámetro de 14 m, es decir tienen una densidad de unos $0,5 \text{ plantas/m}^2$ que cubren entre $78 \text{ y } 150 \text{ m}^2$ cada una.

La estructura se puede apreciar en el diagrama de la Figura V-4 y su distribución espacial en la Figura V-5. Los microclimas que se crean a nivel de la superficie dependen de la cobertura de los elementos principales: café y árboles sombreantes. Podemos distinguir las situaciones siguientes:

bajo cafeto:	51,5 % de la superficie
borde cafeto:	30,0 % de la superficie
cielo abierto:	18,5 % de la superficie

En estos ambientes, el 48% está bajo la sombra parcial de los árboles y el resto (52%) no tiene mayor cobertura que la indicada, es decir:

	% de la superficie	
	con <i>Inga</i>	sin <i>Inga</i>
bajo cafeto	24,7	26,8
borde cafeto	14	16
cielo abierto	8,9	10

Sin embargo, en vista de que algunos árboles de *Inga* crecen, la importancia de los ambientes cambió a partir del muestreo 26:

	% de la superficie	
	con <i>Inga</i>	sin <i>Inga</i>
bajo cafeto:	13.1	18.4
borde cafeto:	7.7	22.4
cielo abierto:	4.7	13.8

4. Fenología:

La fenología de las especies principales, *Inga verticillata* y *C. arabica*, es muy importante dado que dependiendo de la distribución temporal de sus fenofases existirán variaciones en la cantidad y calidad de la hojarasca caída, así como en las actividades agrícolas.

En la Figura IV-9 hemos representado las principales fenofases para estas especies. Las fases reproductivas de *Inga verticillata* (floración y fructificación) están concentradas en la época seca de enero a mayo; finalizando la fructificación comienza la producción de hojas nuevas cuya maduración toma un tiempo más de dos meses de modo que el follaje queda completamente restituido a partir de julio y así se mantiene hasta finales de la época lluviosa en que comienza la caída de hojas. Los meses de febrero, marzo y abril los árboles están desprovistos de hojas.

C. arabica muestra un patrón fenológico igual para ambas variedades en lo referente al desarrollo vegetativo: los cafetos tienen un pico de caída de hojas entre enero y febrero y

apso de producción de hojas en agosto-septiembre aunque mucho menor, que responde a un segundo alargamiento de las ramas.

El proceso reproductivo es lento, dura todo un año: se inicia con la floración de marzo hasta mayo, seguido de un largo periodo de desarrollo de los frutos que sólo en noviembre comienzan a madurar hasta febrero. En el tiempo esto significa que la floración termina con el inicio de la época de lluvias, durante la cual los frutos se desarrollan comenzando la madurez con el inicio de la época seca. Entre las dos variedades hemos encontrado un desplazamiento de casi un mes en el inicio del desarrollo de los frutos y su maduración, siendo los cafetos de sol más precoces. Aparte de esto la cantidad de flores y frutos por rama es mucho mayor en el cafetal de sol.

Los ciclos reproductivo y vegetativo del café tienen sus fases ligadas unas con otras y ambas dependen de ciertas características climáticas. El período seco es especialmente importante: su ubicación en el tiempo determina el momento en que ocurrirán la diferenciación de nudos y yemas florales y en consecuencia determina la ocurrencia de las fenofases; la duración de las mismas puede variar de acuerdo al ritmo de las precipitaciones: entre la floración y el fin de maduración de los frutos puede haber 30 días de diferencia entre una región y otra como consecuencia de diferencias en el régimen hídrico (Trojer, 1968; Browning, 1977). La existencia de por lo menos uno o dos meses con precipitación $>5\%$ de la media anual es indispensable para que se dé la secuencia correcta de fenofases (capítulo I-2).

Para el caso del cafetal de sombra, si sobreponemos los patrones de café con el de los árboles sombreantes vemos que la época más seca y de menor cobertura vegetal corresponde a febrero, marzo y abril y allí se concentran la reproducción de *Ilex peruviana* y la floración de *C. arabica*. La época de mayor caída de hojarasca corresponde con enero y febrero, plena época seca. La época de mayor cobertura vegetal corresponde a los meses de julio hasta diciembre.

5. Calendario agrícola:

Desde noviembre de 1987 hemos seguido la serie de actividades que se han realizado en los cafetales bajo estudio como prácticas normales, las cuales no hemos querido que se interrumpieran en las parcelas demarcadas por nosotros puesto que forman parte importante de su dinámica. Además, de conversaciones con los caficultores, hemos recopilado las principales actividades en los cafetales, las cuales resumimos a continuación.

Las actividades básicas son del mismo tipo en el cafetal en sol y en el de sombra: cosecha, poda, deshierbe y abono. La figura VI-10 muestra la probabilidad de ocurrencia de esas actividades en cada cafetal, porque (aparte la cosecha) no todas se realizan todos los años.

La cosecha: es la actividad más laboriosa y costosa del cafetal. Su preparación se hace con mucha anticipación, desde unos pocos meses antes se van arreglando las cosas que serán

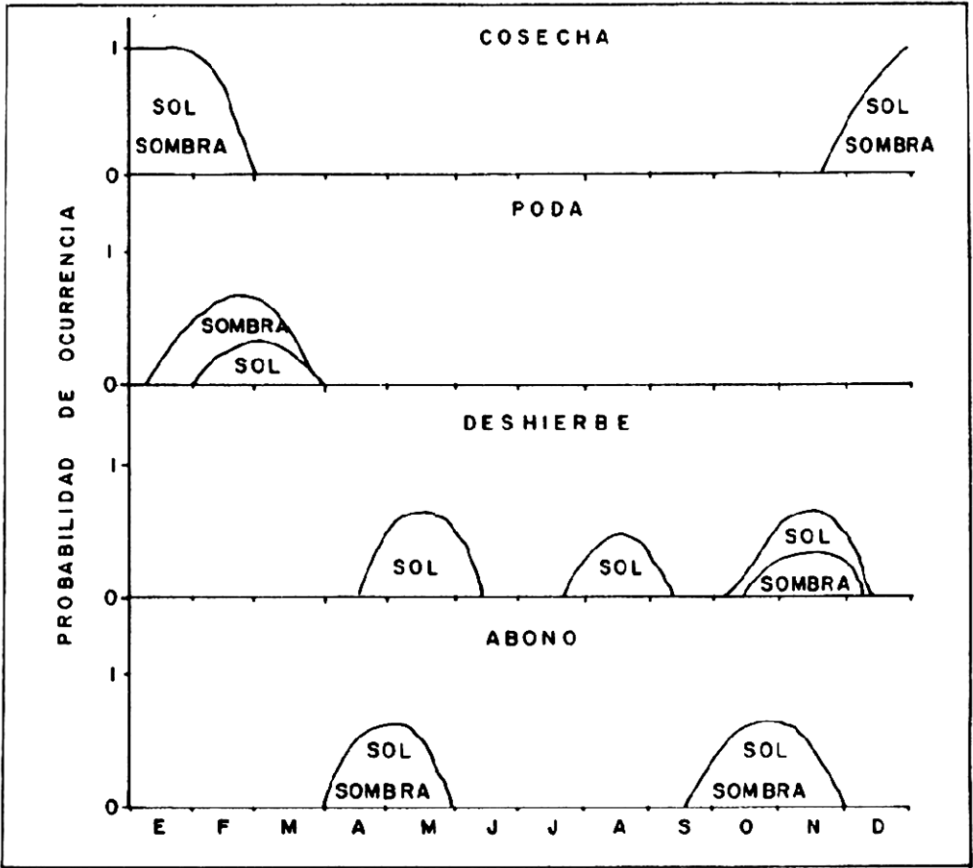


FIGURA IV - 10 Calendario agrícola

necesarias para realizarla, en especial se inicia la organización del mantenimiento de los obreros que será necesario contratar; se compran pollos de engorde y se prevé las necesidades de algunos productos que harán falta para garantizar el almuerzo del personal. La cosecha propiamente dicha comienza en diciembre y termina en febrero, siendo finales de febrero y principios de enero el lapso más intenso. El trabajo requiere la ayuda de obreros, que se contratan para ese fin, y cuyo pago depende del trabajo; los hombres recogen frutos y cargan costales hasta fuera del cafetal / son por eso mejor remunerados que mujeres y niños que solo recogen frutos.

Naturalmente, la cosecha depende de la maduración de los frutos (Figura IV-9) y se pasa por las mismas filas más de una vez en todo ese periodo: en general, por cafetal, existe una primera recolección menor a principios de diciembre, correspondiente a los frutos precoces, luego una o dos cosechas importantes entre mediados de diciembre y mediados de enero, y finalmente otras recolecciones menores hasta finales de febrero, para aprovechar los frutos tardíos.

Esta es la labor que más afecta los primeros centímetros del suelo y la hojarasca por el pisoteo intensivo. Trataremos ese aspecto en el capítulo de erosión.

La poda: se refiere a una eliminación selectiva de ramas de café por varias razones, entre las principales: vejez de la rama, follaje muy denso aumentando peligro de infección fundamentalmente por hongos. En general se realiza después de la

ya que en ese momento las actividades reproductivas y vas están al mínimo (ver fenología).

abono de los cafetales se hace en líneas generales dos al año: una al reinicio de las actividades vegetativas nuevas) y floración y otra antes de la maduración del el criterio utilizado para esta distribución es ayudar a fenofases (ver requerimientos nutricionales, capítulo 1-2). prioridad, se abona con úrea después de la cosecha y abono esto antes de la maduración del fruto, pero esto puede r. No se utiliza en estos cafetales los restos de pulpa como

El deshierbe: se realiza con una frecuencia mayor en el al de sol que en el de sombra (Figura IV-10). En el caso del al de sombra toma todo un año para que al final de la época osa haya un desarrollo de algunas gramíneas y compuestas que fique un deshierbe, y eso sólo en las zonas fuera de la encia de los árboles sombreantes. En el caso del cafetal de las gramíneas, compuestas y helechos tienen la principal rtura a lo largo de todo el año y aunque no se puede hablar echas concretas de deshierbe si podemos mencionar los lapsos probables (más frecuentes) que ocurren a intervalos más o s regulares según esquema de la Figura IV-10.

Para efectos de este trabajo nos interesa destacar dos is: 1) desde el punto de vista de la incorporación de ientes por actividades humanas los cafetales son abonados por el y el deshierbe es más importante en el cafetal de sol, 2)

desde el punto de vista de pisoteo de las parcelas, el cafetal de sol soporta movimientos durante todo el año mientras el cafetal de sombra permanece durante buena parte de la época lluviosa casi sin intervención.

Tal como ya mencionamos, uno de nuestros objetivos es estudiar la dinámica interna del agroecosistema cafetalero y evaluar las consecuencias ecológicas de sus dos tipos de manejo: cafetales de sombra y cafetales de sol. Hemos enfocado nuestra atención en factores que son de gran importancia ecológica y que son afectados de diferentes maneras por distintos tipos de manejo: la dinámica del agua, de los nutrientes, hojarasca y la movilización de la fracción mineral del suelo.

Como primer paso, seleccionamos dos cafetales en una misma finca, uno de sol y otro de sombra, con características similares de pendiente, orientación y geología, los cuales fueron descritos en el capítulo anterior.

En cada uno de esos cafetales estudiamos las entradas, y algunas salidas y flujos que tienen en este sistema los factores mencionados. En la Figura V-1 mostramos un esquema donde se representa los compartimientos del sistema "agroecosistema cafetal" que se relacionan con los factores bajo estudio, así como los compartimientos del medio circundante con los cuales hay relación. Mediante flechas, el mismo esquema muestra los flujos de agua, nutrientes y material vegetal dentro y en la vecindad del sistema, indicando en cada caso el proceso que los determina.

Para estudiar parte de dichos flujos, demarcamos dos parcelas de estudio (una de cada tipo de manejo) dentro de las

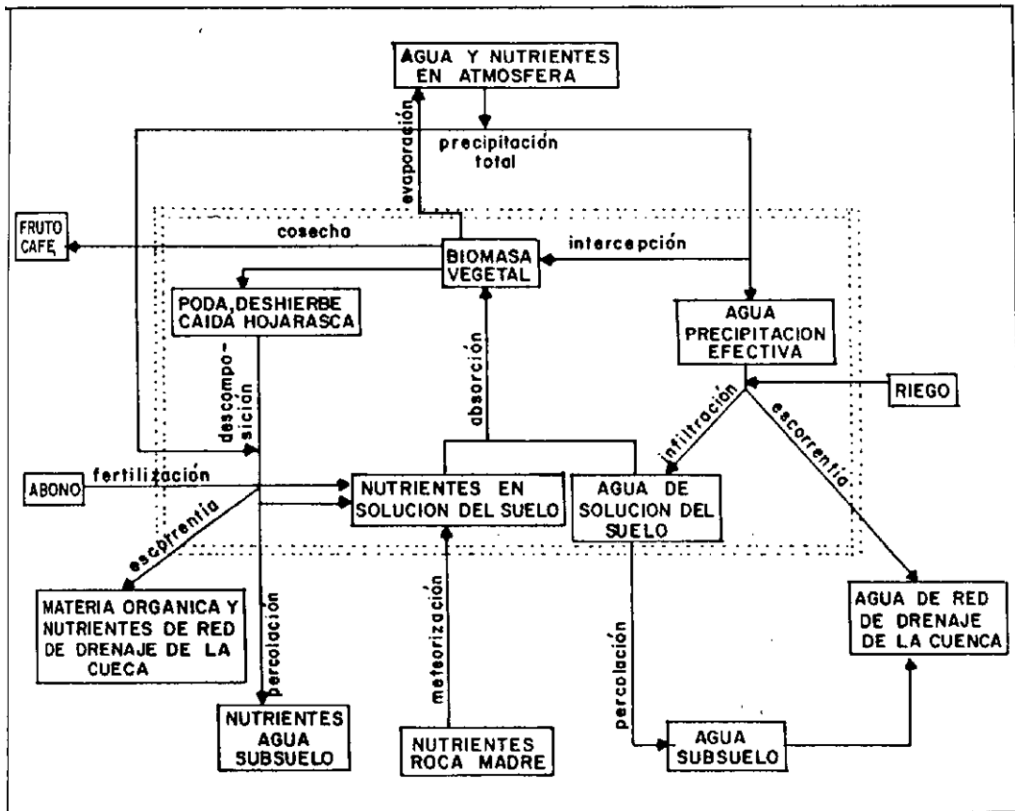


FIGURA V-1: Esquema general del sistema cafetal indicando flujos de agua, nutrientes y materia vegetal, así como los procesos que los determinan. La banda punteada indica los límites del sistema.

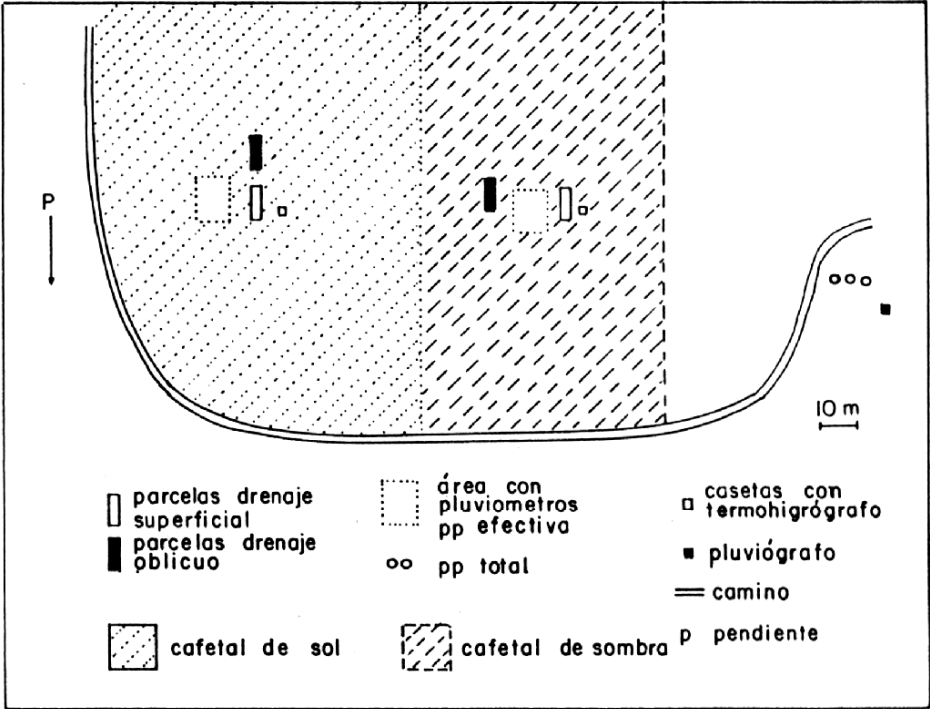


FIGURA V-2: Disposición sobre el terreno de los dispositivos para medidas de campo.

cuales las prácticas agrícolas siguen inalteradas.

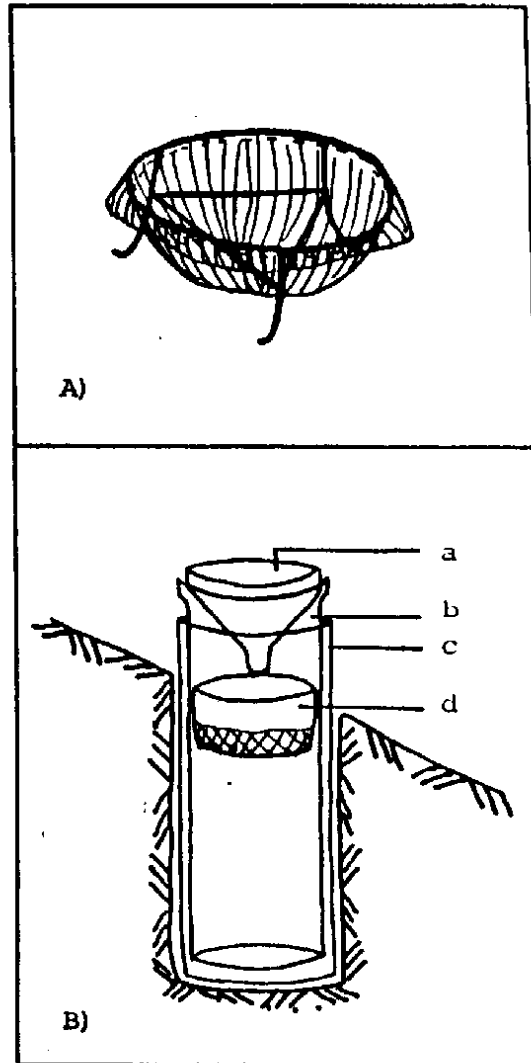
1. LA FABRICACION E INSTALACION DE LOS DISPOSITIVOS PARA MEDIDAS DE CAMPO

En este proyecto utilizamos una serie de dispositivos para realizar medidas y tomar muestras que nos permitan estudiar el balance hidrico y de nutrientes, así como el proceso de erosión a escala de parcelas experimentales. A continuación describimos todos los dispositivos que han sido instalados en la finca del Sr. Mora, distribuidos como se indica en la Figura V-2.

1.1. MEDIDAS DE ENTRADAS DE AGUA Y NUTRIENTES AL SISTEMA:

1.1.1. Los pluviómetros : medidas de precipitación total y precipitación efectiva parcial

Se construyó una serie de pluviómetros utilizando el diseño de Acevedo (1988), (Figura V-3), los cuales consisten en un envase de plástico hecho con tubería para electricidad de 4" de diámetro con un fondo sellado de plexiglas y cuyo borde libre se deforma con calor de modo de que se ajuste a los bordes de un embudo que es el receptor de agua. A envases plásticos pequeños pero del mismo diámetro, se les coloca un fondo de tela de nylon y se introducen en los pluviómetros debajo del embudo para retener la basura que pueda penetrar por él. El área de captación de cada pluviómetro es de $0,00893 \text{ m}^2$, lo que significa que para conocer el equivalente en mm de precipitación hay que multiplicar la cantidad de agua (en ml) contenida en el pluviómetro por 0,112. Cada vez que se vacían los pluviómetros, se vierte en ellos una



FIGURAV-3: A) colector de hojarasca,
B) pluviómetro:
a) embudo colector, b) envase colector
c) soporte, d) filtro



A

B

FIGURAV-4: A) colector de hojarasca
B) pluviómetro

cantidad de parafina que forma una capa sobrenadante en el agua evitando la evaporación sin interferir en los análisis químicos.

Tres pluviómetros se destinaron para medir la precipitación total y fueron instalados a 1,8 m del suelo en área completamente descubierta.

Los pluviómetros (para precipitación efectiva parcial se enterraron hasta dejar 10-15 cm sobre la superficie, garantizando así que no entre en ellos agua de escurrimiento superficial. Para facilitar el ser sacados de la tierra periódicamente, cada hueco que contiene un pluviómetro es forrado con un cilindro hecho con tubo PVC de 4" (Figura V-4). Se distribuyeron de la siguiente manera:

1) cafetal de sombra: 30 pluviómetros se ubicaron sobre tres líneas paralelas cuya distancia (5 y 6 m) se seleccionó al azar. Sobre cada una de esas líneas de 14 m, se distribuyó al azar 10 pluviómetros, para un total de 30. Su disposición en el terreno se observa en la Figura V-5 donde están numerados del 1 al 30. Se nota que hay varias posiciones posibles:

- a) cielo abierto: 16, 18, 24
- b) cubierto sólo con Inga: 23
- c) cubierto sólo con café: 7, 9, 10, 14, 15, 27, 29, 30
- d) en borde de café: 8, 13, 25, 26, 28
- e) en borde de café y cubierto con Inga: 2, 4, 5, 11, 12, 22
- f) cubierto con café e Inga: 1, 3, 6, 21

No han entrado en los cálculos los pluviómetros 17, 19 y 20, el primero por ser afectado por una corriente de agua que al chocar contra un tronco saltaba hacia el embudo y los otros dos por sufrir la interferencia aleatoria de una planta de cambur

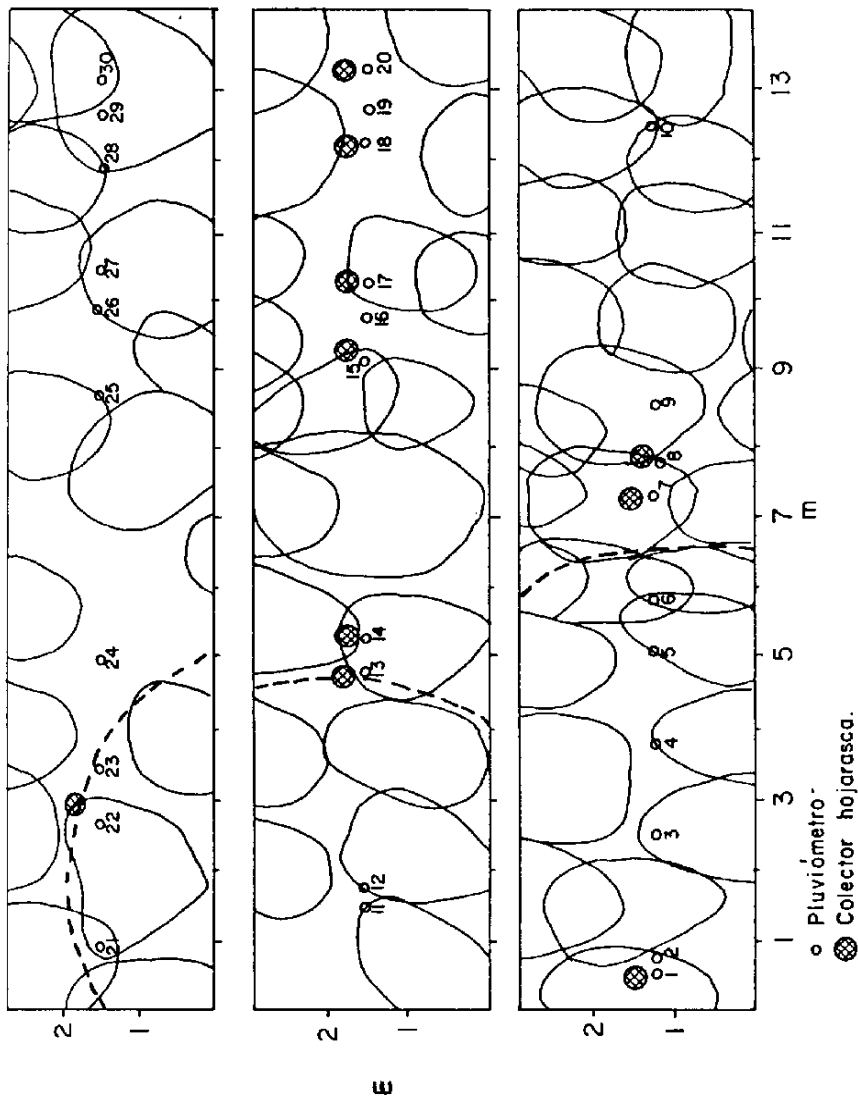


FIGURA V-5: Cafetal de sombra: proyección de los cafetos sobre tres bandas de terreno de 14x3 m y disposición de pluviómetros y colectores de hojarasca.
Línea punteada: proyección de *Inga oerstediana*.

vecina.

Sin embargo, en vista de que en la época lluviosa de 1989 el árbol de Inga que cubría la línea 1 se murió, la distribución de los pluviómetros bajo Inga no es la misma; así a partir del muestreo 26:

- a) cielo abierto: 16, 18, 24
- b) cubierto solo con Inga: 38, 43, 45
- c) cubierto sólo con café: 1, 3, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 27, 29, 30.
- d) en borde de café: 2, 4, 5, 8, 13, 25, 26, 28
- e) en borde de café y cubierto con Inga: 11, 12, 22
- f) cubierto con café e Inga: 35, 42, 46, 48

Los pluviómetros extras (no incluidos en la Figura V-5) fueron colocados en otro sector del cafetal de sombra donde los árboles sombreantes estaban en buenas condiciones.

2) cafetal de sol: se delimitó una parcela de 10x10 m dentro de la cual se tomaron 20 puntos al azar y en cada uno de ellos se colocó un pluviómetro. Su disposición sobre el terreno se puede observar en la Figura V-6, donde están numerados del 1 al 20. En este cafetal se distinguen tres posiciones diferentes (que representan tres ambientes diferentes):

- a) a cielo abierto: 1, 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11
- b) en el borde de cafeto: 3, 9, 12, 16, 18, 20
- c) debajo de cafeto: 4, 13, 14, 15, 17, 19

Para determinar el tipo de cobertura de los pluviómetros hemos utilizado medidas de campo y el análisis de las fotos del que hablaremos en el próximo punto (1.1.2.). Es así como en el caso del cafetal de sol al hacer, un seguimiento de cada pluviómetro algunos de ellos mostraron ser de borde de cafeto y

luego estar debajo de él por crecimiento de la planta o al contrario por poda. Estos cambios han sido considerados y la distribución que hemos dado de los pluviómetros corresponde a la posición más frecuente.

Los números distintos en los cafetales de sol y sombra se seleccionaron considerando que la heterogeneidad ambiental en el cafetal de sombra era mayor en virtud de tener un elemento extra de variabilidad: el sombreado de los árboles.

Esta descripción de la ubicación de los pluviómetros, así como la proporción de superficie que ocupa cada microambiente (capítulo III) es la que hemos utilizado en el análisis de los resultados para dar su justo peso a los valores de precipitación efectiva parcial; es decir corregir los datos de campo en función de la heterogeneidad espacial.

Por último queremos aclarar que cuando hablamos de "cielo abierto" nos referimos a que ninguna vegetación cubre directamente el suelo o pluviómetro, pero es evidente que por su cercanía con alguna planta ésta sí afecta la medida ya sea por salpicaduras o por sombreado (la lluvia no es forzosamente vertical). Es decir, que no podemos de entrada pretender que las medidas de los pluviómetros a "cielo abierto" sean iguales a las de los pluviómetros de precipitación total.

1.1.2. Cobertura vegetal

Las medidas de precipitación efectiva parcial realizadas con los pluviómetros están directamente relacionadas con la cobertura

de la vegetación, la cual, dependiendo de las condiciones del momento, puede frenar la caída de agua (intercepción) o servir de elemento concentrador de agua de lluvia o rocío. Es por ello que hemos considerado importante realizar una medida de la cobertura vegetal de cada pluviómetro. Para ello tomamos periódicamente una foto vertical sobre cada pluviómetro (cámara orientada hacia arriba) con un lente 28 mm. Luego de revelar las fotos podemos establecer la relación entre la cobertura y cada medida de pluviómetro, además de tener una secuencia de variaciones fenológicas.

1.1.3. Los colectores de tronco: medida del agua que escurre por los troncos

Por intercepción del follaje, parte del agua de precipitación queda retenida al alcanzar la vegetación. Otra parte llega al suelo directamente o por goteo habiendo rozado la superficie de hojas y ramas: esta es la que se mide mediante los pluviómetros. Sin embargo, ésta no es la única fracción de precipitación que llega al suelo ya que una parte del agua originalmente interceptada escurre por las ramas hasta los tallos o troncos deslizándose así hasta el suelo: esta fracción de la precipitación efectiva que no puede medirse con pluviómetros debe, de todas formas, ser evaluada. Para ello, instalamos colectores de tronco según el diseño mostrado en la Figura V-7. Estos colectores consisten en una especie de embudo confeccionado con plástico flexible que se adhiere alrededor del tronco con asfalto y cintas plásticas, dejando menos de 1 cm de luz en su borde superior y una salida inferior con un tubo de 0,5



FIGURAY-7: Dispositivo para medir esturrimiento por los troncos en plantas de café.

cm de diámetro.

En el cafetal de sombra se instalaron 2 colectores en árboles de *Inga oerstediana* y 4 en cafetos, mientras que en el cafetal de sol fueron 3 en cafetos. El mayor número en el cafetal de sombra responde a la arquitectura de los cafetales de esa variedad la cual es más compleja que la de la variedad de sol.

1.1.4. Los colectores de hojarasca: medida de la caída de hojarasca

La medida de incorporación de hojarasca a través del tiempo en la superficie del suelo se realiza utilizando colectores de hojarasca (Figuras V-3 y V-4). Se trata de un anillo de hierro levantado unos 20 cm del suelo y de 33 cm de diámetro que soporta una bolsa de tul de nailon.

Colocamos 10 colectores en cada cafetal, ubicándolos un poco más arriba de 10 pluviómetros escojidos al azar en cada caso.

Su disposición en el terreno se observa en las Figuras V-5 y V-6. En el cafetal de sombra notamos que 3 colectores están bajo *Inga oerstediana*, de los cuales uno está fuera de cafeto, uno en borde de cafeto y otro bajo cafeto. El resto de los colectores están: 3 bajo cafeto, 3 en borde de cafeto y uno influenciado por cambur.

En el cafetal de sol, uno está a cielo abierto, 4 están en borde de cafeto y 6 bajo cafeto.

La hojarasca colectada en esta forma se ha clasificado en el

laboratorio, colector por colector, como sigue:

- a) tallos, hojas y flores de café
- b) frutos de café
- c) tallos, hojas, flores y frutos de otras especies

1.2. MEDIDAS DE SALIDAS DE AGUA, NUTRIENTES Y FRACCION MINERAL DEL SUELO, DEL SISTEMA

1.2.1. Drenaje superficial

En cada uno de los dos tipos de cafetal hemos instalado una "parcela de erosión" de 6x2 m. El lado mayor está en el sentido de la pendiente la cual es la misma para ambas parcelas: 31°.

Las parcelas se construyeron según el diseño mostrado en las Figuras V-8 y V-9.

La Figura V-10 muestra la cobertura relativa de cada parcela de erosión. Los ambientes se distribuyen así:

ambientes	% de la superficie	
	cafetal sol	cafetal sombra
bajo cafetos:	37	64
borde de cafetos:	22	30
cielo abierto:	41	6

En el caso del cafetal de sombra se encuentra toda bajo *Inga oerstediana*.

Estos valores de importancia de los microambientes son los que hemos utilizado para corregir los datos de precipitación efectiva parcial en las parcelas de erosión, de modo que los

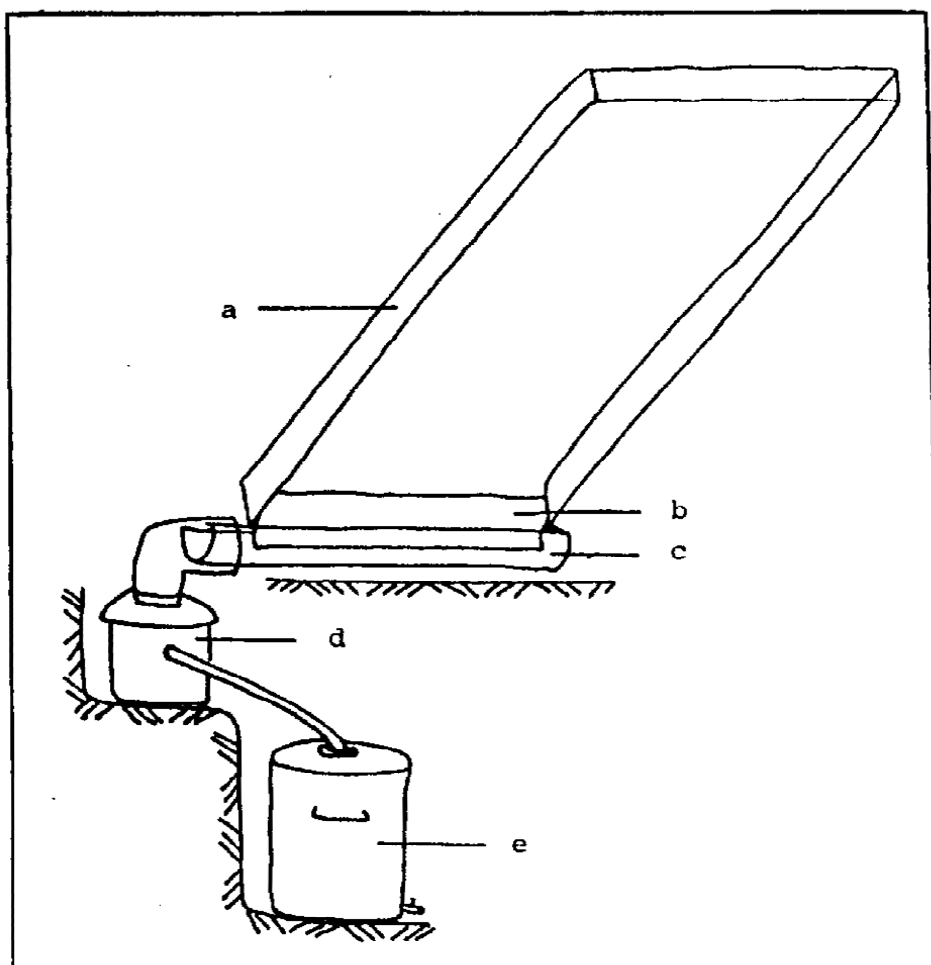


FIGURA V-8: Esquema de las parcelas de erosión.
a) bordes de acerolit
b) plástico de deslizamiento
c) canal
d) trampa de sedimento
e) tanque de depósito



FIGURA V-9: Parcela de erosión en el caretal de col.

resultados de escurrimiento estén relacionados con lo que realmente recibió la parcela y no con un promedio del cafetal.

Esta parcelas de erosión nos permiten cuantificar la salida superficial de agua y materiales de los sistemas bajo estudio. Mediante la canal, la trampa de sedimento y el tanque de depósito podemos recoger y medir mensualmente lo siguiente:

- 1) cantidad de agua que pierde cada sistema por drenaje superficial,
- 2) cantidad de hojarasca que pierde el sistema por el mismo medio,
- 3) cantidad de fracción mineral del suelo que es arrastrada fuera del sistema,
- 4) cantidad de nutrientes (K, Ca, Mg y Na) que se pierden en solución del suelo,

Después de varias pruebas, determinamos las condiciones operativamente óptimas de las parcelas: tamaño= 6 x 2 m; trampa de sedimento= 25 l; tanque de depósito= 200 l; revisión periódica= 10 días en época lluviosa y 20 días en época seca.

1.2.2. Drenaje oblicuo (interno del suelo)

Originalmente, nos habíamos propuesto la construcción de lisímetros para medir el drenaje profundo. Sin embargo, las condiciones del terreno y de la vegetación no permiten que esto sea posible. Es por ello que diseñamos el siguiente sistema para medir el drenaje oblicuo haciendo que éste incluyera el horizonte funcional del suelo. Se trata de una parcela de tamaño 6x2 m con

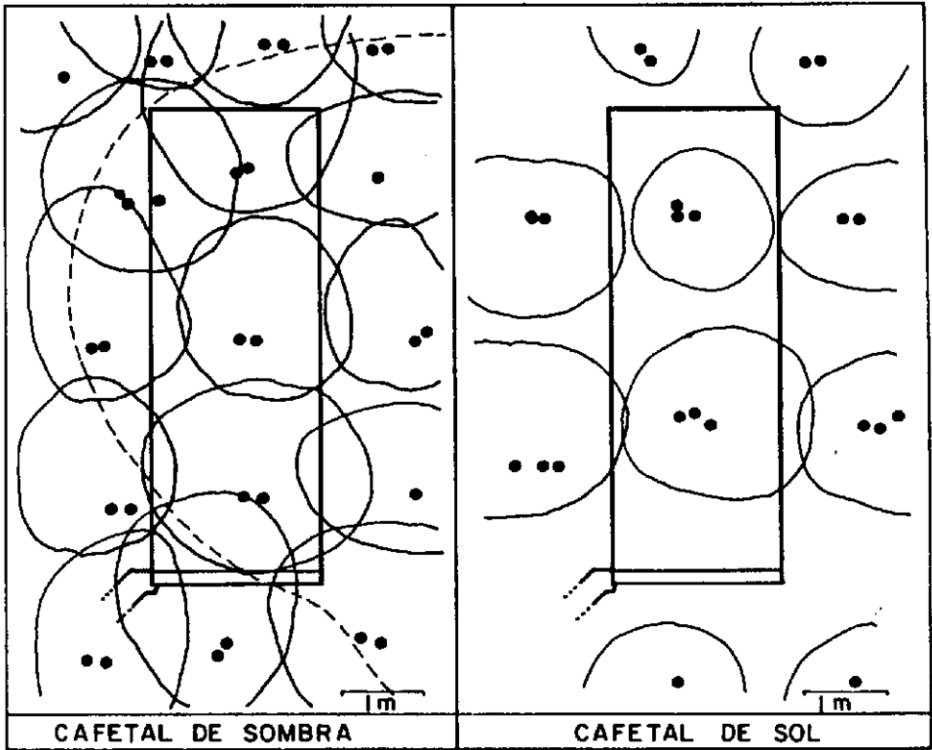


FIGURA V-10: Proyección de los cafetos sobre las parcelas de erosión
 Línea punteada: proyección de Inga oerstediana.

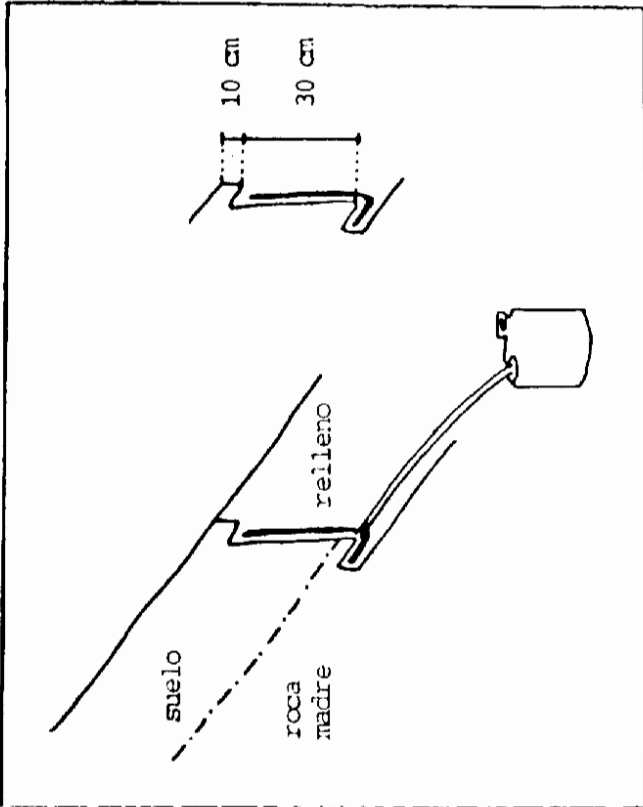


FIGURA V-11: A) aspecto de la parcela de drenaje còlico en el cafetal de sol.

B) corte longitudinal de la parcela mostrando la ubicaci3n de la canal.

perfiles distribuidos dos al pie de cafetos, dos entre dos cafetos de la misma línea y los dos últimos dos entre líneas, en el cruce de las dos diagonales entre cuatro cafetos dos de una línea y dos de la línea siguiente. Esta distribución responde a los tres microambientes principales del cafetal.

Las muestras son tomadas con barreno y envasadas en latas herméticas. El secado se hizo por tres semanas en estufa entre 115° y 120° C.

El análisis de densidad aparente, dato necesario para convertir el valor de contenido de agua en el suelo en unidades equivalentes a mm de precipitación, se realizó tomando 3 muestras en cada horizonte con cilindro de 7,7 cm de diámetro y con profundidad correspondiente a cada estrato (10 cm en todos los casos, de donde el volumen del cilindro es 460,57 cm³). Cada muestra fue secada en la estufa y el peso seco se tomó separando la fracción mayor de 4 mm del resto; también se pesó aparte el material de raíces para evaluar su importancia. De cada fracción se tomó además el volumen, medido por desplazamiento de agua. Para el cálculo de la densidad aparente se utilizó la fracción <4 mm.

3. CARACTERISTICAS CLIMATICAS

3.1. Precipitación:

La precipitación la hemos medido de dos formas: una con pluviómetros, de los cuales ya hemos descrito la forma, número y distribución en el punto 1.1.1., y otra con un pluviógrafo de

registro continuo instalado en área abierta a 2,5 m del suelo. Esto nos permite hacer el análisis de los resultados de dos formas (que responden a dos objetivos distintos):

1) haremos un seguimiento en el tiempo de los valores absolutos de entrada de agua discriminados en : a) por período de muestreo, b) por época seca y lluviosa, y c) calculando el total anual; todo eso con el objetivo de hacer balances hídricos correspondientes a los lapsos señalados,

2) haremos un análisis de frecuencia e intensidad de eventos de lluvia en los lapsos indicados antes.

En el capítulo II presentamos varios índices de erosividad de los cuales vamos a utilizar en este análisis el AI_e propuesto por Lal en 1976, por dos razones: una que existen evidencias de su mayor bondad al menos para ambientes tropicales, y otra que utiliza variables relativamente simples en cuanto al tratamiento de los datos.

El índice ai_e se obtiene multiplicando la precipitación total del aguacero (a) en cm por la máxima intensidad (I) en $cm \cdot h^{-1}$ registrada en ese mismo evento. El índice AI_e para un cierto período se obtiene sumando todos los ai_e de ese período:

$$AI_e = \sum_1^n ai_e$$

donde n es el número de tormentas en el período deseado.

Como la precisión del registrador empleado no nos permite una definición mayor de 30 min, el cálculo de intensidades lo

hicimos para este lapso de tiempo, es decir que para nuestro análisis I_{30} es la máxima intensidad en 30 min. Siguiendo los criterios de Wischmeier & Smith (1978), Páez (1980), Lizaso (1980), hemos incluido en el análisis sólo los eventos con más de 10 mm totales.

Un evento se separó de otro al transcurrir más de una hora con menos de 0,25 mm.

3.2. Evapotranspiración

En este proyecto no medimos directamente los procesos de evaporación ni transpiración dentro de los sistemas pero se puede tener una medida aproximada de ellos conociendo ciertas características de orden climático. Con esa idea, instalamos una garita meteorológica con un termohigrógrafo en cada cafetal, al nivel de los cafetos (Figura V-2). Con los datos de temperatura y humedad relativa allí obtenidos hemos utilizado la fórmula de García & López (1970) la cual discutimos en el capítulo II, con la idea de tener una primera aproximación a la evapotranspiración de ambos cafetales.

Utilizaremos también, a modo de comparación, la fórmula clásica de Thornthwaite, cuya expresión matemática está en el capítulo II.

4. LA HOJARASCA SOBRE EL SUELO

El estimado del nivel inicial de hojarasca de las parcelas de erosión, se hizo colectando toda la hojarasca contenida en una

parcela de 3x2 m, adyacente a cada una de las dos primeras parcelas de erosión. El sentido de esta medida es doble:

1) tener una estimación de la cantidad de hojarasca en el momento de comenzar el experimento de las parcelas de erosión, las cuales después de haber sido cerradas sufren la pérdida normal de hojarasca por escurrimiento superficial pero no reciben más incorporación que la correspondiente a la caída de hojas sobre la parcela. Con estos valores iniciales de hojarasca y los valores periódicos de caída, podemos evaluar la proporción de hojarasca removida por drenaje superficial.

2) tener una evaluación de la hojarasca acumulada en distintos momentos del año.

La hojarasca colectada en estas parcelas se ha clasificado como la de la hojarasca caída.

Las parcelas de erosión originales eran de 6x4 m y fueron divididas a 6x2 m el 01-08-88 (las parcelas originales se hicieron imposibles de manejar por el volumen de agua colectado en época lluviosa y al dividir las se solucionó este problema sin por ello perder la heterogeneidad de microambientes que se desea pueden representados). Se aprovechó el área desechada para hacer una puesta al día de la hojarasca de ambas parcelas haciendo un arrido de 1 m² en cada caso.

Esta última fecha corresponde casi al comienzo del ciclo anual que tratamos en este trabajo de modo que estos son los valores que usaremos de hojarasca inicial en las parcelas de erosión, después de haberles sumado lo que cayó desde que se

cerraron las parcelas hasta ese momento y restado lo que se perdió por erosión en el mismo lapso.

5. ANALISIS QUIMICO

En esta etapa hemos trabajado sólo con cationes disueltos. Analizamos el contenido de K, Mg, Ca y Na en muestras periódicas de:

- 1) agua de precipitación total (entrada de nutrientes al sistema por precipitación total)
- 2) agua de precipitación efectiva parcial (modificación de dicha entrada por el follaje de la vegetación)
- 3) agua de escurrimiento por los troncos (modificación de entrada por precipitación por efecto de ramas y troncos)
- 4) agua de drenaje superficial (pérdida por erosión a gran escala por lavado superficial)

Las muestras de agua son tomadas de los pluviómetros en el campo (seleccionado de modo que representen las distintas coberturas) y tanques de las parcelas de erosión. Son envasadas en frascos plásticos, agregando 1 cc de ácido nítrico concentrado en aquellos que se usarán para análisis de K, Mg, Ca y Na. Estos son analizados con el método de absorción atómica con llama aire-acetileno.

Hasta el momento, todos los análisis se realizan en el Laboratorio de Espectroscopía Molecular de la Facultad de Ciencias, U.L.A.

Por diversos problemas (algunos de diseño, otros por imposibilidad del Laboratorio de procesar el número de muestras que deseáramos) no todos los resultados provienen de la acumulación de agua indicada para cada lapso. Es decir, en ciertos casos las muestras de agua fueron acumuladas y el valor dado es el valor absoluto medido (en el ANEXO 7 están los valores reales medidos y los lapsos a los que corresponden); pero en otros casos, el agua no fue acumulada y entonces el valor dado es una extrapolación del valor siguiente inmediato.

6. LA TOMA DE DATOS

Después de : a) seleccionar un cafetal que cumpliera con las características requeridas para el trabajo y b) construir e instalar los dispositivos de campo mencionados, se inició el proceso de toma de datos, el cual sigue la siguiente secuencia:

A : en el campo en promedio cada 10 días en período lluvioso y cada 20 días en período seco:

1) medición volumen de agua en pluviómetros, tanques de la parcela de erosión y de la de drenaje interno, tanques de colectores de tronco

2) recolección de:

a) hojarasca en colectores y canal de las parcelas de erosión.

b) muestras de agua de pluviómetros, tanques de las parcelas de erosión y colectores de tronco.

c) muestra de sedimento en los tanques de las parcelas de erosión.

d) en caso de ser momento de poda, deshierbe o cosecha, hacer la recolección correspondiente.

3) cambio de las bandas de termohigrógrafos y pluviógrafo

4) toma de fotos para cobertura

5) muestras de suelo a tres profundidades en 5 perfiles

B: en el Laboratorio:

1) secado y pesado de muestras de suelo para cálculo de % de agua

2) separación cualitativa de las muestras de hojarasca de acuerdo con diversas categorías: hojas y ramas de café, frutos de café, hojas, ramas y partes reproductivas de otras especies.

3) secado y pesado de hojarasca clasificada

4) análisis químico de aguas

5) secado y pesado de sedimentos

VI — RESULTADOS Y DISCUSION

1. LA PRECIPITACION TOTAL

La precipitación total es la única entrada de agua al sistema de los cafetales que estamos estudiando. Su monto, distribución, frecuencia e intensidad son características que deben conocerse en un estudio como este, pues son muy importantes en la interpretación de la dinámica hídrica y los procesos erosivos.

La variabilidad interanual es grande y hubiera sido muy conveniente tener para el sitio de trabajo un registro de varios años que nos permita estudiar las secuencias de pluviosidad en el tiempo y ubicar el comportamiento del periodo de muestreo dentro de esa secuencia. Pero desafortunadamente la estación meteorológica más cercana está instalada en el pueblo de Canaguá con un desnivel de unos 170 m, lo cual es mucho en estos ambientes de montaña. Creemos, sin embargo, que es interesante tener en mente las características generales de esa estación, las cuales fueron mostradas en la Figura IV-2. Se nota un régimen biestacional bien marcado, con un período seco de cuatro meses de diciembre a marzo y otro lluvioso de abril a noviembre, con una media anual de temperatura de 18,5 °C.

Como indicamos, la extrapolación de estos datos (en especial precipitación) a nuestro lugar de trabajo no es lícita, pero da una idea del patrón general esperable.

TABLA VI-1: Distribución de la precipitación en las parcelas bajo estudio

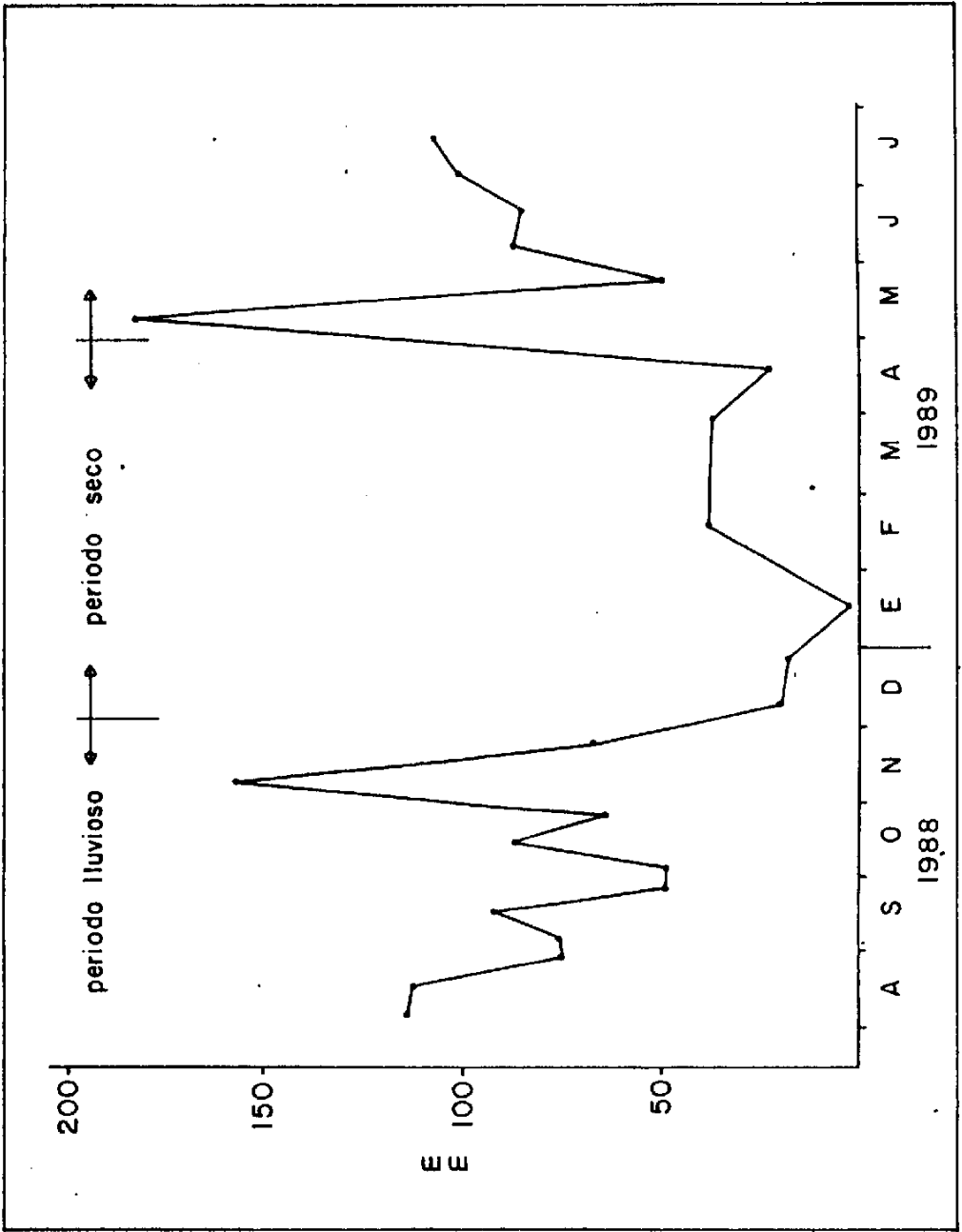
PERIODO	LAPSO	DIAS	PRECIPITACION mm	%	mm/día
LLUVIOSO *	mayo a noviembre	197	1.467,63	86	7,4
SECO	diciembre a abril	168	239,11	14	1,4
TOTAL	agosto 1988 a julio 1989	365	1.706,74	100	4,7

*: los valores comprenden (agosto a noviembre 1988) + (mayo a julio 1989)

Por medio de los pluviómetros ubicados a cielo abierto hemos medido la precipitación total en los cafetales bajo estudio con el mismo sistema que utilizamos para precipitación efectiva parcial (ANEXO 1). En la Figura VI-1 mostramos la distribución de estas precipitaciones para el lapso agosto 1988 - julio 1989. Quedan bien diferenciados dos períodos, uno seco y otro lluvioso, definidos con las características que vemos en la TABLA VI-1.

Es interesante destacar los meses de transición, noviembre y mayo, que mostraron los picos más irregulares y mas altos del año.

Las precipitaciones en el área de trabajo tienen un régimen biestacional que corresponde a toda cuenca que recibe la influencia de los vientos llaneros. La precipitación total es alta, sin embargo su distribución estacional deja 5 meses secos.



Wischmeier (Capítulo II) mostró que desde el punto de vista de la capacidad erosiva de las lluvias, es más importante analizar su intensidad que sus valores absolutos. En especial los ambientes tropicales han mostrado lluvias con muy altas intensidades que han llevado a la elaboración de fórmulas más adaptadas para medir su erosividad. En la Figura VI-2 mostramos la marcha anual de la intensidad media de lluvia en el lapso agosto 1988-julio 1989, y también, para cada muestreo, la intensidad del evento con mayor intensidad. Podemos destacar tres cosas: a) vemos que, en promedio, las lluvias del período seco tienen la misma intensidad que las del período lluvioso, b) las dos mayores intensidades registradas corresponden a los meses de transición y c) si relacionamos estos datos con las cantidades de lluvia, para ver si son esos eventos "torrenciales" los que determinan la marcha de las precipitaciones notamos que la correlación no es muy buena ($r=0,65$) lo cual seguramente se deba a que en nuestro caso las intensidades muy altas generalmente son de corta duración (Figura VI-3). Kowal & Kassam (1979) encontraron un coeficiente de correlación de 0,78 en Samaru, Nigeria del Norte, pero con intensidades máximas mayores de 75 mm.h^{-1} .

Hemos ordenado los datos de intensidad por lapsos de muestreo en la TABLA VI-2 tomando dos límites: el primero es de $2,9 \text{ mm.h}^{-1}$ corresponde a la intensidad media del año (y que puede catalogarse como lluvia entre moderada y fina), la cual nos permite separar los eventos pequeños de muy baja intensidad, y el segundo es de 10 mm.h^{-1} (catalogada como de lluvia fuerte a

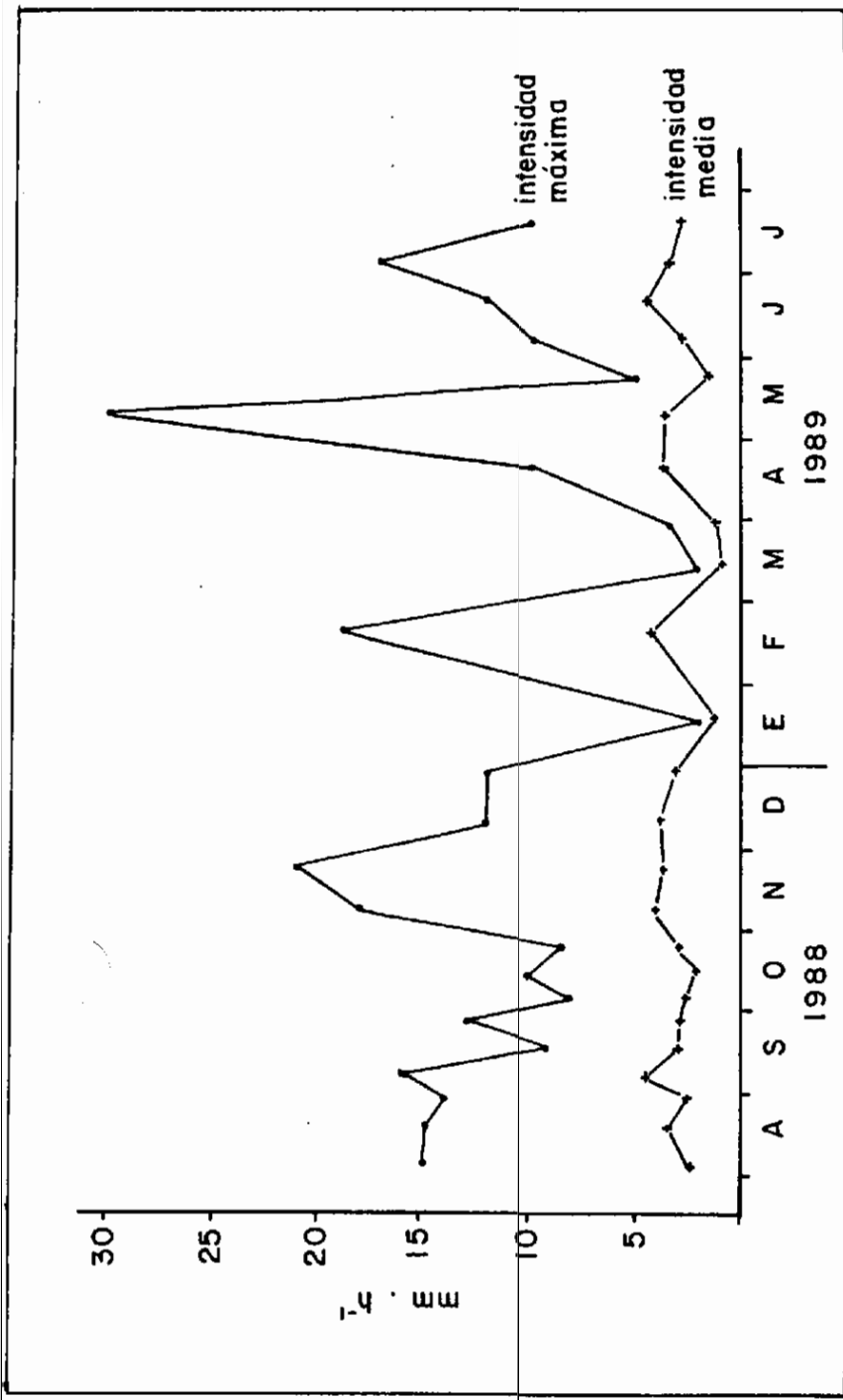


FIGURA VI-2: Intensidad media de eventos de lluvia, por muestreo, indicando el evento de mayor intensidad total.

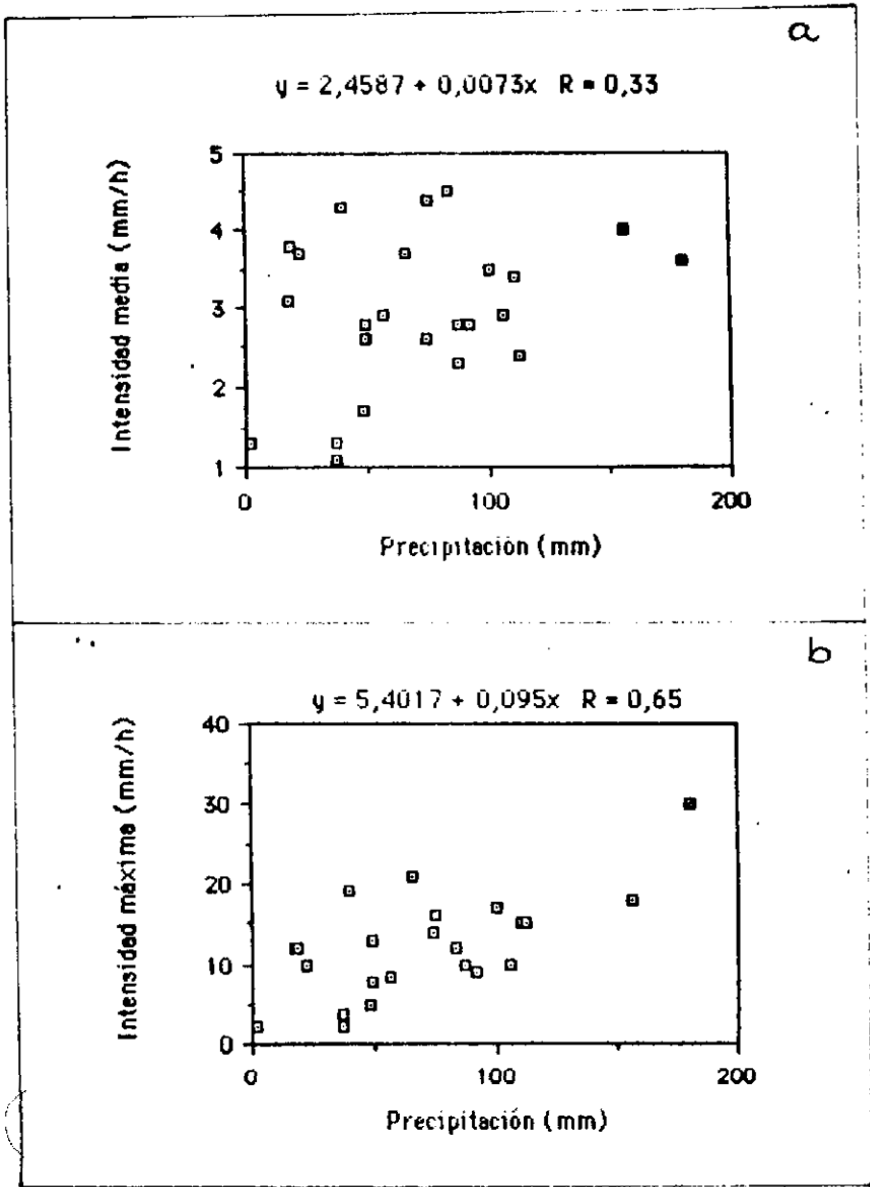


FIGURA VI-3 : Correlación entre precipitación e intensidad media (a) y máxima total (b) de los eventos

TABLA VI-2: Intensidad de lluvias entre agosto 1988 y julio 1989

LAFSD	NUMERO EVENTOS	N ^D EVENTOS CON INTENSIDAD			INTENSIDAD DE LOS EVENTOS >10mm.h ⁻¹
		<2,9	>2,9	>10	
27-07-88/ 11-08-88	29	22	7	1	15
11-08-88/ 24-08-88	25	16	9	2	13 - 15
24-08-88/ 02-09-88	20	13	7	1	14
02-09-88/ 10-09-88	11	5	6	1	16
10-09-88/ 20-09-88	18	13	5	0	
20-09-88/ 30-09-88	19	14	5	1	13
30-09-88/ 07-10-88	9	5	4	0	
07-10-88/ 19-10-88	13	11	2	1	10,1
19-10-88/ 01-11-88	16	10	6	0	
01-11-88/ 15-11-88	15	9	6	2	14 - 18
15-11-88/ 01-12-88	17	11	5	1	21
01-12-88/ 18-12-88	6	4	2	1	12
18-12-88/ 06-01-89	8	6	2	1	12
06-01-89/ 27-01-89	3	0	3	0	
27-01-89/ 07-03-89	13	8	5	2	13 - 19
07-03-89/ 17-03-89	9	9	0	0	
17-03-89/ 07-04-89	14	13	1	0	
07-04-89/ 02-05-89	8	5	3	1	10
02-05-89/ 15-05-89	25	17	7	2	12 - 30
15-05-89/ 29-05-89	15	13	2	0	
29-05-89/ 14-06-89	31	21	10	0	
14-06-89/ 27-06-89	11	3	7	2	10 - 12
27-06-89/ 10-07-89	21	12	9	1	17
10-07-89/ 24-07-89	18	11	7	1	10

moderada), que de acuerdo con la bibliografía puede considerarse como el límite para erosiones importantes.

Vemos que: a) el número de eventos con intensidad mayor que la media es algo menor que un tercio de los eventos, b) que los eventos mayores de 10 mm.h^{-1} ocurren todo el año, c) que estos últimos tienen un máximo de cuatro por mes (para el año considerado) siendo 21 en total, y d) sólo uno supera los 25 mm.h^{-1} (30 mm.h^{-1} en mayo, duró un cuarto de hora).

Estos resultados no constituyen un análisis de erosividad pero nos predicen que: 1) la erosividad de estas lluvias no será muy alta y 2) que la distribución a lo largo de todo el año de los eventos de alta intensidad conllevará a pérdidas continuas de suelo.

El análisis anterior nos permite tener una idea de las características generales de las precipitaciones en el área. Sin embargo, desde el punto de vista de la "agresividad" de las lluvias como agente erosivo las intensidades máximas dentro de cada evento dan mejor información. Tal como mencionamos en la metodología, seleccionamos los eventos con más de 10 mm y calculamos su intensidad máxima en 30 min. Los resultados están en el ANEXO 2 y la Figura VI-4. Vemos como los eventos de más de 10 mm son una proporción pequeña del total de los eventos, pero que ocurren todos los meses a excepción de los más secos. Sin embargo, las intensidades máximas de esas lluvias no son muy grandes. Lizaso (1980) encontró para La Concepción (Cuenca alta del Guanare), el máximo de esas intensidades en el rango 20-30

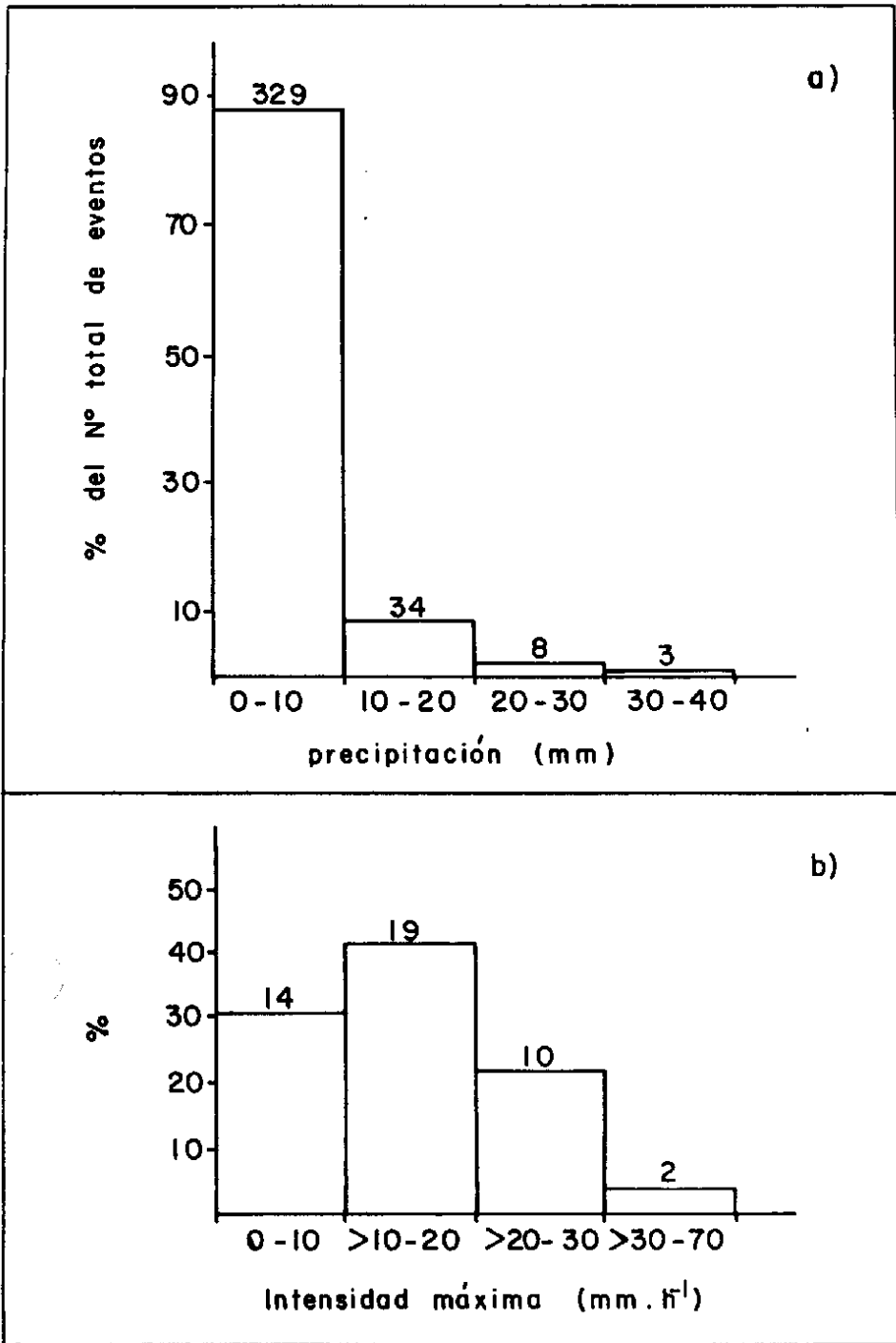


FIGURA VI- 4 : Lluvias agosto 1988- julio 1989.
 a) distribución de eventos por mm totales
 b) distribución de eventos por intensidades máximas para lluvias >10 mm.

mm.h⁻¹ (47%), aunque el rango total de intensidades es el mismo.

Repetidas veces en la literatura se ha dado por universal las medidas de Hudson (1971) de que una lluvia de intensidad menor de 25 mm.h⁻¹ no produce erosión. Maass et al (1988), trabajando en México, partieron del supuesto que con precipitaciones menores de 30 mm por evento no se produce erosión. De ser así nosotros no tendríamos pérdida de suelo en todo el año salvo 6 días según el primer criterio y 3 días según el segundo, y mostraremos en el capítulo de erosión que esto no es cierto.

Kowal & Kassam (1979) dicen no encontrar escurrimiento con precipitaciones menores de 20 mm, lo cual corresponde en su caso a intensidades máximas menores de 88 mm.h⁻¹ (Nigeria del Norte). En nuestro caso las dos únicas tormentas con intensidad máxima mayor de 30 mm.h⁻¹ son: 34,5 y 64 mm.h⁻¹. Aquí hay que advertir que la mayoría de los trabajos que hacen análisis de erosividad en ambientes tropicales son realizados en Africa, donde de acuerdo a las tablas de intensidad que esos autores presentan, el grueso de las precipitaciones tiene intensidades mucho mayores de 25 mm.h⁻¹. Es necesario tener esto en mente puesto que tendemos a hacer comparaciones con más facilidad con trabajos africanos que con aquellos realizados en zonas templadas.

Sin embargo, Morgan (1978) indica que intensidades mayores de 10 mm.h⁻¹ causan levantamiento de partículas (erosión "splash") y Richter & Negendank (1977) obtuvieron erosión laminar con lluvias de 6 mm.h⁻¹. Fullen (1985) en sus estudios en

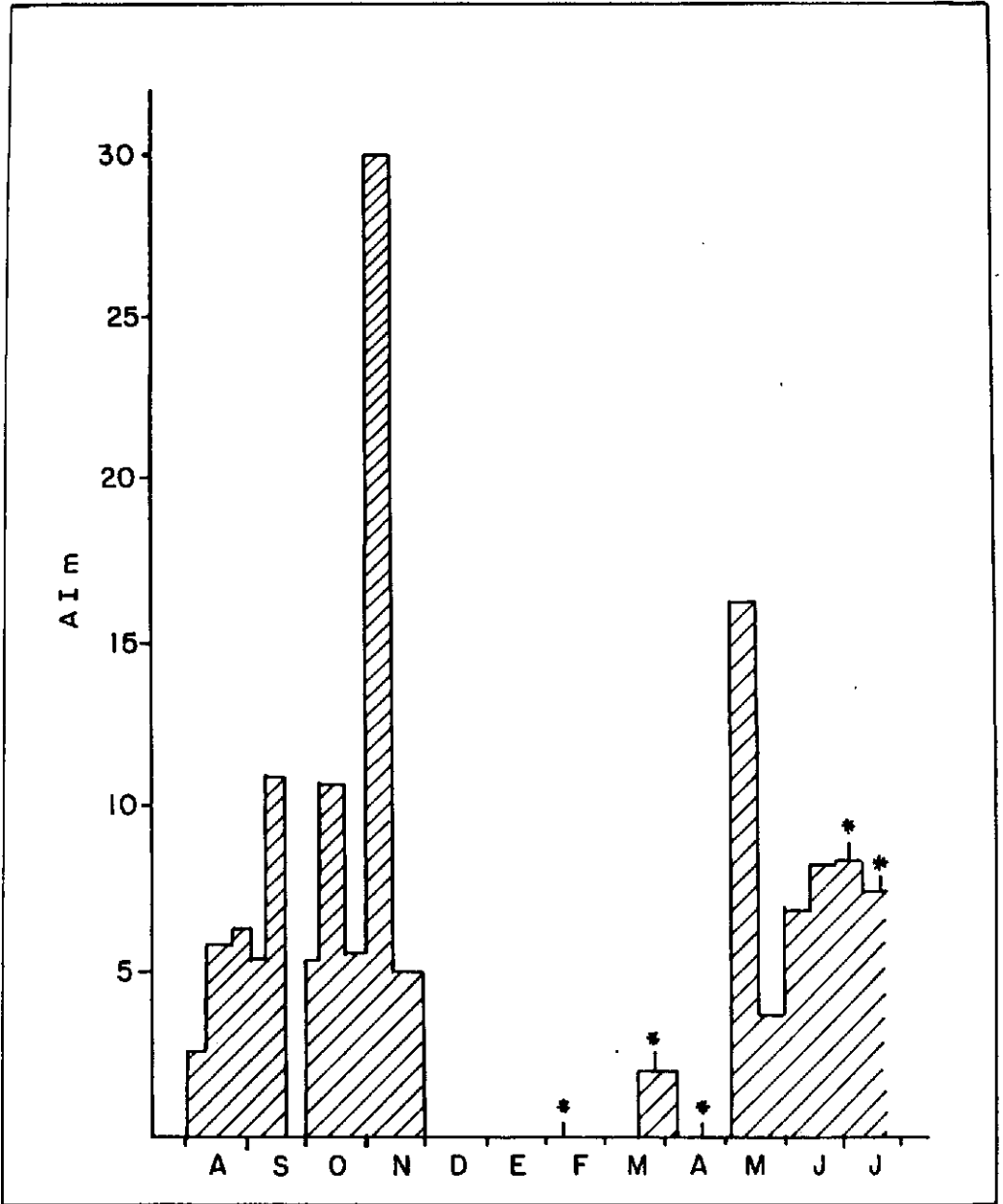


FIGURA VI- 5 : Variación de erosividad de las lluvias para el año estudiado, según índice AIM.
 * : 5 tormentas no analizadas.

(Inglaterra) midió erosión con lluvias de 2 mm.h^{-1} , señalando que la erosión aumenta exponencialmente a medida que se aumenta esa intensidad y que niveles de pérdida de 2 t.ha^{-1} son los que requieren intensidades mayores de 10 mm.h^{-1} . En suelos similares Reed (1979) midió erosión bajo lluvias de 1 mm.h^{-1} .

Todo esto demuestra que bajo distintas condiciones la importancia de la intensidad de las precipitaciones no es la misma. Evans (1981) encontró, en Inglaterra, que en verano son erosivas lluvias de alta intensidad y corta duración (10 mm.h^{-1}), mientras en invierno 20 mm en 2 o 3 días producen erosión.

Como se describió en el capítulo II, encontrar alguna relación matemática entre precipitación y erosión - escurrimiento ha sido motivo de trabajo de muchos autores y así han surgido varios índices que nos permiten conocer la erosividad de las lluvias y se supone que como consecuencia se predice los momentos de mayor arrastre de material. Hemos analizado los datos de precipitación de los cafetales bajo estudio utilizando el índice AI y los resultados pueden verse en el ANEXO 2 y la Figura VI-5. De acuerdo con estos resultados, la mayor erosividad de las lluvias se encuentra en los meses de transición, seguida de una erosividad muy baja durante el período lluvioso y una erosividad casi nula durante el período seco. Si este fuera el factor erosivo determinante el análisis de pérdida de suelo debería tener la misma forma que la Figura VI-5. Naturalmente que en este momento solo consideramos las características de la lluvia y su posible impacto, en el capítulo de erosión discutiremos el efecto de los distintos cafetales y actividades agrícolas.

2. PRECIPITACION EFECTIVA E INTERCEPCION

Los resultados que discutimos en este trabajo de entradas y salidas de agua se encuentran resumidos en el ANEXO 1. Los valores allí indicados corresponden a las medidas absolutas realizadas en el campo transformadas (para hacerlas comparables) a mm de precipitación o lo que es lo mismo, a litros por m² horizontal. Cada medida de salida de agua está, además, expresada en porcentaje de lo que entró en ese lapso (precipitación total).

En los cafetales bajo estudio la única entrada de agua es por precipitación (PT). Al entrar en contacto con el agroecosistema, parte del agua de lluvia es interceptada por la vegetación y parte llega a la superficie del suelo. No podemos medir directamente el agua que es interceptada (I) pero si podemos medir la que llega al suelo: precipitación efectiva (Pet). Esa llegada al suelo puede ser: a) por goteo de la vegetación y/o incidencia directa, esta es la precipitación efectiva parcial (Pep) o b) por escurrimiento por los troncos (ET), de modo que:

$$Pet = Pep + ET$$

y también:

$$I = PT - Pet$$

En la Figura VI-6 se muestra la relación entre la precipitación total y las precipitaciones efectivas en cada cafetal.

Se nota en primer lugar que para ambos sistemas la precipitación efectiva sigue la tendencia de la precipitación

total, es decir que las variaciones en la vegetación no influyen en este aspecto.

A lo largo de todo el año la precipitación efectiva en el cafetal de sol es mayor que en el de sombra, sin embargo, en precipitaciones menores de $6 \text{ l.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ las diferencias entre precipitación efectiva de los cafetales de sol y sombra no son tan grandes, la media de esas diferencias es 4,1. Por el contrario, la media de las diferencias es 9,0 cuando las precipitaciones son mayores de 6 mm.día^{-1} . Es decir que cuanto menos llueve más similarmente se comportan los dos cafetales. Esto es lógico en el periodo seco, ya que de enero a abril ambos cafetales tienen su mínimo de cobertura y por lo tanto ambos se comportan como una vegetación muy abierta. Pero el follaje de Inga no llegó a su máximo hasta julio (ver fenología) y en consecuencia hasta entonces los dos cafetales tienen una precipitación efectiva similar porque si bien los cafetos de sombra en principio interceptan más por su arquitectura y su mayor cobertura también sucede que su escurrimiento de tronco es mayor (como veremos más adelante).

Sin embargo, para el periodo lluvioso, supusimos en un inicio que la intensidad de las precipitaciones debía tener relación con la capacidad de intercepción: pensábamos que cuando la vegetación permaneciera constante y en su máximo deberíamos esperar: a) que la precipitación efectiva fuera alta si lo que hay son chubascos de intensidades altas y b) baja si se trata de lloviznas, con la idea de que chubascos de alta intensidad

podían vencer la resistencia de las hojas por la energía cinética de las gotas, mientras que bajo lloviznas las hojas podían retener un volumen mayor de gotas. En nuestro caso tratamos de establecer una relación entre precipitación efectiva e intensidad de lluvias en el lapso agosto-diciembre (lapso de mayor cobertura), pero no hubo ninguna relación: ni correlacionando con lluvias de intensidad menor que la media ($2,9 \text{ mm.h}^{-1}$ que es lluvia de moderada hasta llovizna), ni con su frecuencia, ni con lluvias de intensidad mayor de 10 mm.h^{-1} . Lo cual significa que el follaje no retiene mejor las lluvias finas que las fuertes; es probable que esta relación sólo se observe con lluvias mucho más fuertes que las que ocurren aquí, aunque Rutter & Morton (1977) detectan ese efecto con lluvias de intensidades entre $0,3$ y $1,5 \text{ mm.h}^{-1}$.

No podemos dar el valor límite de precipitación a partir del cual la intercepción es del 100% ya que no tenemos medidas que discriminen el efecto de cada lluvia sino acumulados por lapsos, pero al respecto es interesante notar que para el lapso de menor precipitación 06-01-89 al 27-01-89 (21 días) hubo sólo tres lluvias, todas de menos de media hora para un total de $1,9 \text{ mm}$, sin embargo todos los pluviómetros tanto en sol como en sombra (excepto uno en sombra) mostraron que existía precipitación efectiva parcial. Naturalmente se trata de valores muy bajos, menos de la mitad de la precipitación total en la mayoría de los casos pero varios pluviómetros de borde de cafeto tuvieron valores una vez y media mayores. Esto significa que la capacidad de carga de agua de esta es vegetación menor de 1 mm , lo cual es

pequeño si comparamos con los datos de Nizinski & Saugier de 2,2 mm en una vegetación desprovista de hojas y en invierno, es decir con baja evaporación, mientras que en nuestro caso si bien es cierto que el dato corresponde a la mínima cobertura también es cierto que coincide con los mayores valores de evapotranspiración (como veremos más adelante). Desafortunadamente, los datos para el lapso de máxima cobertura cubren demasiados días, en los que ocurren demasiadas lluvias para poder detectar la capacidad de carga de agua del follaje cuando éste está en su plenitud; sería indispensable hacer seguimientos evento por evento durante varios días en la estación lluviosa. Este tipo de tratamiento fue lo que permitió a Rutter (1963) estimar tasas de evaporación del agua interceptada, estableciendo relaciones entre por ejemplo la medida de 1,4 a 1,8 mm de capacidad de carga para *Pinus sylvestris* y valores de intercepción diarios entre 2,0 y 3,0 mm.

En la Figura VI-7 se muestran los valores absolutos en $l.m^{-2}$ para cuatro compartimientos del balance hídrico (y dos subcompartimientos). Ellos corresponden al lapso agosto 1988-julio 1989.

En el cafetal de sombra hacemos distinción entre las condiciones generales del cafetal y lo que sucede en la parcela de erosión que es la única con la que podemos relacionar los resultados de drenaje superficial y erosión. Esto sucede por la heterogeneidad presentada por este cafetal, en el que en todo caso debimos instalar más parcelas de este tipo. En efecto, y para correlaciones en un futuro hemos instalado (septiembre 1988) otra parcela en zona de mayor densidad de árboles sombreantes.

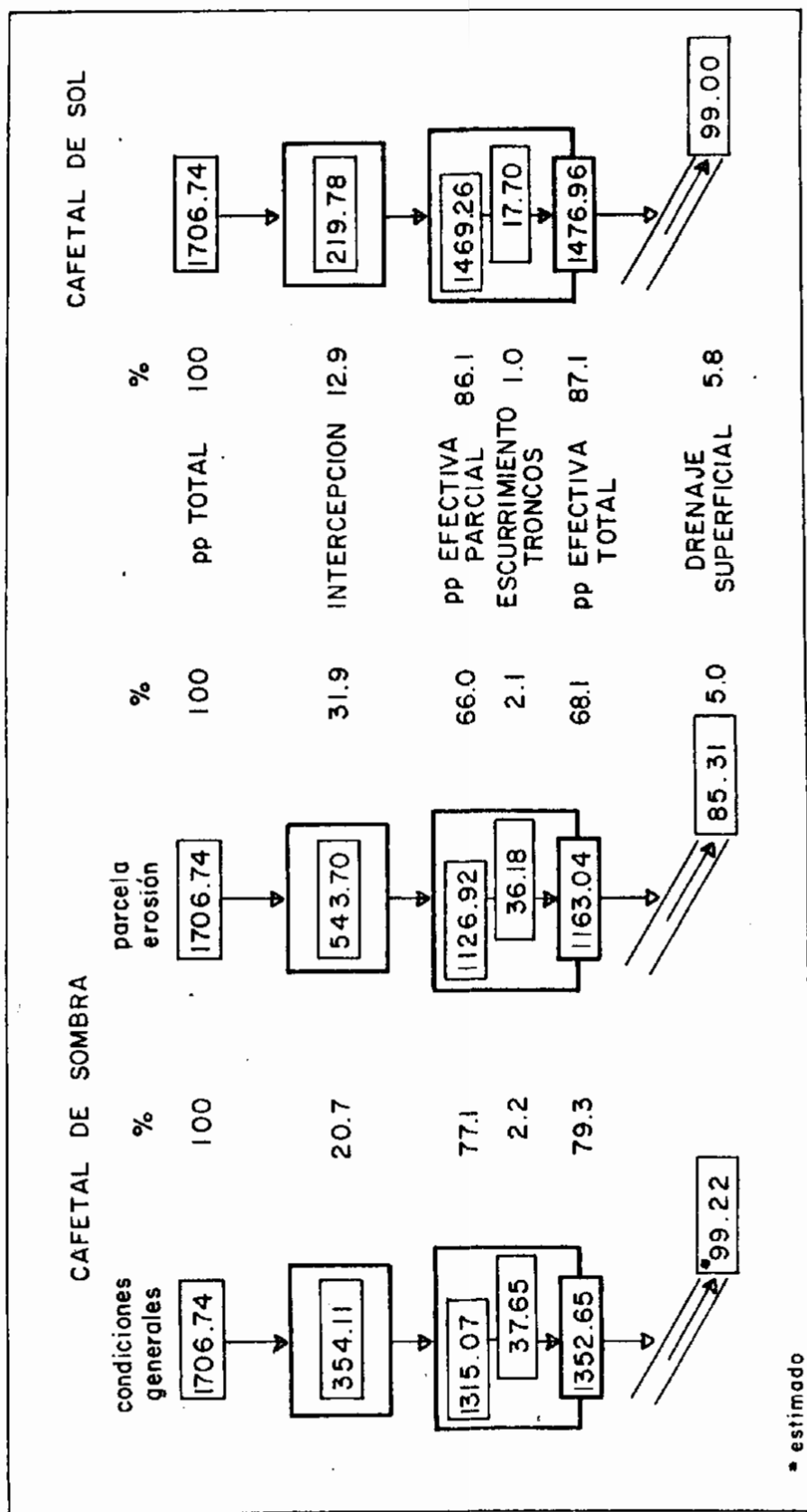


FIGURA VI-7: BALANCE HIDRICO PARCIAL, Lapso 27-07-88 al 24-08-89.
 Dentro de las casillas: valores absolutos en L. m⁻²
 Fuera de las casillas: % de precipitación total.

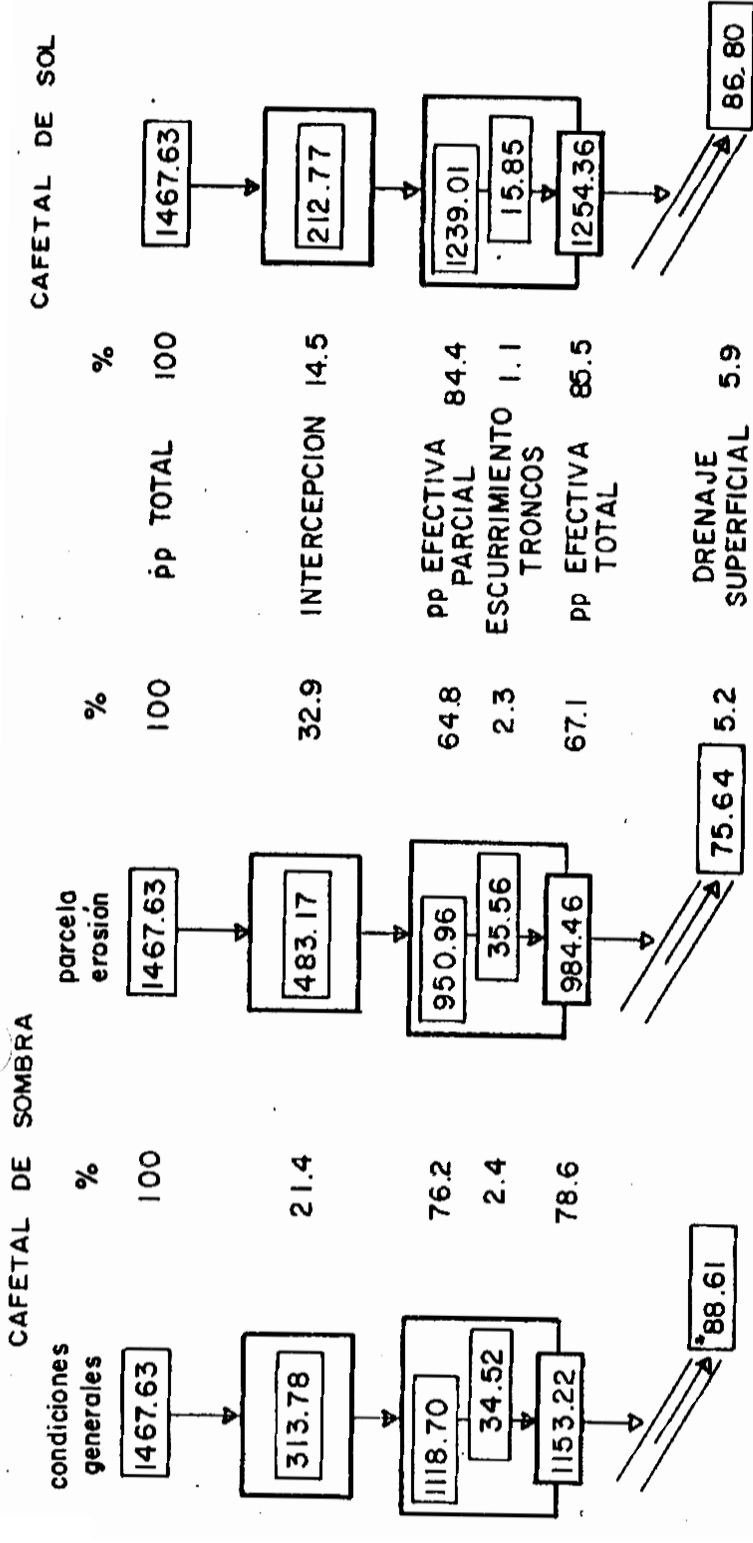
Presentamos los resultados separados de esta manera para respetar las condiciones distintas en cada sitio. En el caso de la parcela del cafetal de sol no hay diferencias entre la parcela de erosión y el resto del cafetal.

Estos resultados nos permiten ver en primer lugar que la intercepción del agua de precipitación por parte de la vegetación es casi el doble en los cafetales de sombra que en los de sol, lo cual era previsible dada la mayor cobertura vegetal en los primeros. El valor de retención de 20% de la precipitación total que hemos obtenido está en el rango de lo registrado en otros ambientes forestales tropicales (TABLA II-3, Capítulo II).

Por ese efecto de intercepción, la precipitación efectiva parcial es menor (9% menos del total) en el cafetal de sombra que en el de sol. De modo que, el agua que llega a la superficie del suelo con capacidad erosiva es 10% menos en el cafetal de sombra si consideramos el cafetal en general, pero es 23% menos en la parcela de erosión.

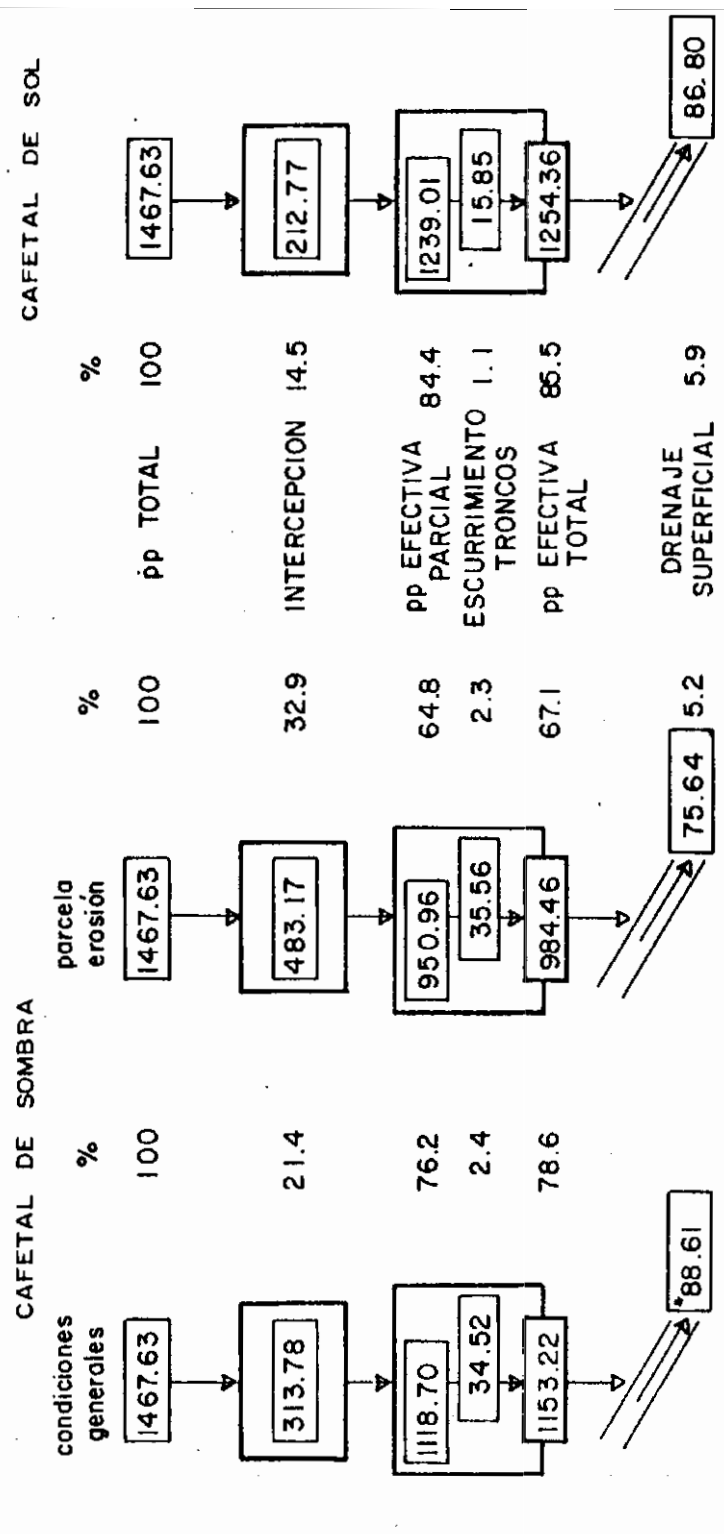
Esto es si comparamos los cafetales haciendo un balance anual, pero así quedan enmascarados los efectos intraanuales. Es interesante ver su comportamiento bajo dos situaciones muy diferentes marcadas por las dos grandes estaciones del año: periodo seco y periodo lluvioso. Las Figuras VI-8 y VI-9 muestran estos resultados.

Se aprecia que las diferencias en intercepción son notables: en el periodo seco el cafetal de sombra intercepta 5,7 veces lo que el de sol, lo cual determina que la precipitación efectiva



estimado

FIGURA VI-9: BALANCE HIDRICO PARCIAL, PERIODO LLUVIOSO.
 Dentro de las casillas: valores absolutos en L.m⁻²
 Fuera de las casillas: % de precipitación total.



* estimado

FIGURA VI-9: BALANCE HIDRICO PARCIAL , PERIODO LLUVIOSO.
 Dentro de las casillas: valores absolutos en L.m²
 Fuera de las casillas: % de precipitación total.

3. ESCURRIMIENTO POR LOS TRONCOS

En algunas investigaciones sobre balance hídrico la entrada de agua que realmente alcanza el suelo se mide con los pluviómetros cercanos a él, pero en realidad esos aparatos sólo miden el agua de goteo de la vegetación y la fracción de lluvia que les llega directamente, por eso hemos llamado a esa medida "precipitación efectiva parcial". Sin embargo, esa no es la única entrada de agua de precipitación al suelo ya que parte del agua interceptada por el follaje termina escurriendo por ramas y troncos. En este trabajo hemos medido este escurrimiento en plantas de café y de *Inga oerstediana*; los resultados están resumidos en el ANEXO 1.

Podemos notar varias cosas en estos resultados: en primer lugar, la cantidad de agua que escurre por los troncos, tanto de café como de las plantas sombreantes, es alta. Si recordamos que en promedio una planta de café variedad *arabica* cubre $3,2 \text{ m}^2$, de variedad *bourbon* $1,65 \text{ m}^2$ y de *Inga oerstediana* 78 m^2 , entonces por cada mm de precipitación que llega a la planta el escurrimiento por su tronco es según la proporción indicada en la TABLA VI-3. Estos datos revelan que las plantas de var. *bourbon* son las que más escurren agua por sus troncos, llegando a medidas de 7% del agua que reciben mientras que lo máximo registrado para la var. *arabica* es 3,45%. Si aunamos esto al hecho de que la var. *bourbon* tiene mayor precipitación efectiva parcial en el borde del follaje podemos decir que esta variedad retiene un mínimo de agua en su follaje, de modo que los bajos valores de intercepción

TABLA VI-3 : % de la pp (que llega a cada planta) que escurre por los troncos

MUESTREO	Inga	var. arabica	var. bourbon
6	0,32	2,09	5,60
7+8	0,31	3,45	7,37
9	0,17	2,05	4,12
10	0,15	1,60	3,25
11		1,87	3,34
12		2,44	2,89
13		1,27	2,46
14		1,84	2,97
15		2,33	2,01
16		2,00	1,83
17		2,69	2,28
18		1,07	4,43
19		1,05	1,12
20		1,27	1,09
21		0,00	0,00
22		0,57	0,61
23	0,10	0,76	3,28
24	0,28	1,07	1,38
25	0,06	0,71	1,38
26	0,28	2,44	3,06
27	0,17	1,10	2,84
28	0,13	1,39	3,58
29		2,23	4,90
30		1,63	3,79
31		2,30	4,94

El cafetal de sol no sólo se debe a la menor cobertura en ese cafetal sino al efecto individual de cada planta que retiene menos agua que la variedad de sombra. Esto puede deberse a la disposición más simétrica de sus ramas que producen una estructura tipo hongo con hojas muy inclinadas hacia el suelo (discutiremos este punto en el capítulo VI-7 de variabilidad espacial).

Por el contrario, el árbol sombreante muestra las menores proporciones de escurrimiento. Aunque no tenemos aún suficientemente procesados los datos, es interesante señalar que algunos pluviómetros extras instalados bajo ramas de *Inga* dan valores altísimos lo que indicaría que las ramas principales de esta especie (que son muy horizontales) descargarían parte de su agua de escurrimiento antes de llegar al tronco. Rutter (1963) observó por azar en plantaciones de *Pinus sylvestris* que los valores de más del doble de la media registrados por los pluviómetros a pocos cm de los troncos se debía a un goteo intenso en la unión de las ramas con el tronco en los momentos de ocurrir la precipitación. Este fenómeno llamó tanto su atención que diseñó un sistema para su medida, pero los resultados finales en términos de mm referidos al área ocupada por cada árbol dió valores tan bajos (entre 1 y 15% de lo escurrido por los troncos) que lo consideró despreciable.

Naturalmente que al considerar el cafetal en su conjunto, la mayor densidad de plantas en el de sombra determina que el agua recibida por escurrimiento de troncos sea mayor por unidad de superficie; puede llegar a escurrir hasta un 3% de la

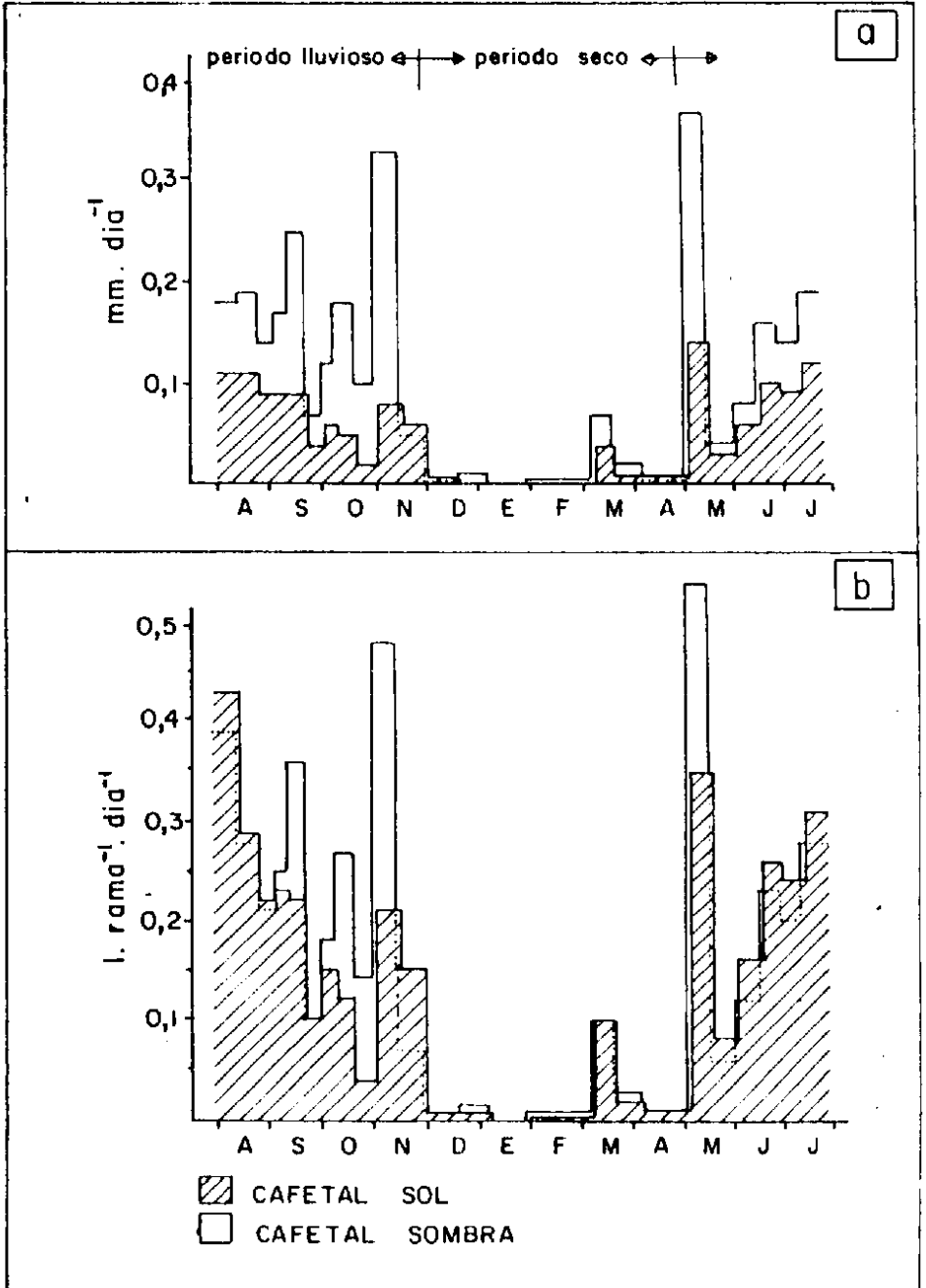


FIGURA VI-10: Esguerrimiento por los troncos: a) por unidad de superficie. b) por rama.

precipitación total, en contraste con un máximo de 1,6% en el cafetal de sol. Esto se observa con claridad en la Figura VI-10, donde además se ve que a pesar de cubrir el doble de superficie el café de sombra escurre por rama casi lo mismo que el de sol a lo largo de todo el año con la excepción notable de los momentos con alta precipitación.

En consecuencia, no nos sorprende que en el balance anual, el cafetal de sombra tiene 2,2% de escurrimiento de troncos contra 1% en el de sol (Figura VI-7). Sin embargo, las Figuras VI-8 y VI-9 muestran que durante la época seca la proporción de agua escurrida es mucho menor. Varias cosas pueden contribuir a eso: 1) la corteza seca absorbe buena parte del agua que le llega, 2) en esa época la evaporación sobre todas las superficies es mayor y 3) la intercepción aumenta. Los dos primeros puntos parecen ciertos pero el 3º no lo es: ya vimos cuando hablamos de intercepción que el % de agua retenida durante la época seca es muy pequeño. Debemos recordar que es durante la época lluviosa cuando el follaje es más extenso y su mayor superficie receptora de agua determina también un mayor escurrimiento.

4. ESCORRENTIA O DRENAJE SUPERFICIAL

El agua que llega a la superficie del suelo sigue cuatro posibles caminos: 1) es retenida por la hojarasca y los primeros centímetros del suelo, 2) es evaporada, 3) escurre (drenaje superficial) y 4) se infiltra en el suelo. Los dispositivos instalados en el campo nos permiten medir el agua que escurre, y esos son los datos que presentaremos ahora.

El drenaje superficial depende de muchos factores como por ejemplo: cantidad, intensidad y frecuencia de lluvias, estructura, densidad y arquitectura de la vegetación, textura y estructura del suelo, tipo y grado de uso de la tierra. Depende de tantos factores que la comparación entre valores de lugares diferentes debe hacerse con mayor énfasis en el orden de magnitud que en los valores absolutos. La forma, tamaño y pendiente de la parcela de erosión también influye en los resultados (capítulo III).

La mejor forma de dar una idea general del drenaje superficial es indicando la proporción que representa de la precipitación total y efectiva; en nuestro caso, con parcelas de 5m de longitud y 31° de pendiente, tenemos como balance anual:

	% de pp efectiva	% de pp total
cafetal sombra	7,3	5,0
cafetal sol	6,7	5,8

Como medida de comparación, en la TABLA VI-4 mostramos

algunos datos de escorrentia para ambientes tropicales (en lo posible forestales o arbustivos) con pendientes moderadas a fuertes.

TABLA VI-4 : escorrentia en ambientes tropicales

		pendiente en grados	pp total mm	% escorr.	
maiz+frijol	Etiopia	37		4,9	Hurni, 1984
bosque denso siempreverde	Costa Marfil	18	2100	0,5	Roose, 1981
	"	59		1,2	"
	"	13	1750	0,4 a 5,5	"
bosque denso semideciduo	"	9	1450	0,5 a 1,4	"
bosque alto	Cuba Sierra Maestra	44		2	Renda et al 1988
bosque degradado	"	6		3	"
plantación de coníferas	"	10		1	"
cafe sombra	"	12		5	"
cafe sombra	"	9		2	"
pasto en montaña	"	13		61	"
pasto en montaña	"	10		53	"
pasto en montaña	"	3		13	"
yuca	"	20		3	"
maiz	"	9		14	"

Son valores muy bajos comparados con los señalados por Solchanov (1963), quien da los siguientes datos de escorrentia

en porcentaje de precipitación efectiva para pendientes de 30° (montañas de Bulgaria):

SISTEMA	LONGITUD DE LA PARCELA (sentido de la pendiente)	
	2m	100m
pastizal	90 %	66 %
bosque abetos	89 %	51 %
bosque hayas	14 %	7 %

Estos valores parecieran indicar que la longitud de la parcela influye notablemente en los resultados, pero Roose (1981) presenta las conclusiones de varios autores que no están de acuerdo con esto: Wischmeier (1966) dice que no encontró relación significativa entre escorrentía y longitud de las parcelas (trabajos de 10 años en 12 localidades, E.E.U.U.), Borst & Woodburn (1942) encontraron lo mismo, Lal (1975) encontró diferencias importantes entre parcelas de 12m y las de 37m pero lo atribuyó más a la forma de la pendiente que a su longitud, Valentin (1978) tampoco encontró diferencias significativas entre parcelas de 1, 2, 5 y 10 m. De todas formas es importante recordar, desde el punto de vista del análisis global del sistema, que los valores de drenaje superficial que se obtienen de parcelas de erosión tienen la limitación de ser completamente aisladas y por lo tanto son muy útiles para establecer comparaciones entre distintos tratamientos pero la validez de su extrapolación, por ejemplo a nivel de cuenca, es dudosa.

En la Figura VI-11 se observa la marcha anual de la escorrentía en ambos cafetales. Se nota que las tendencias son

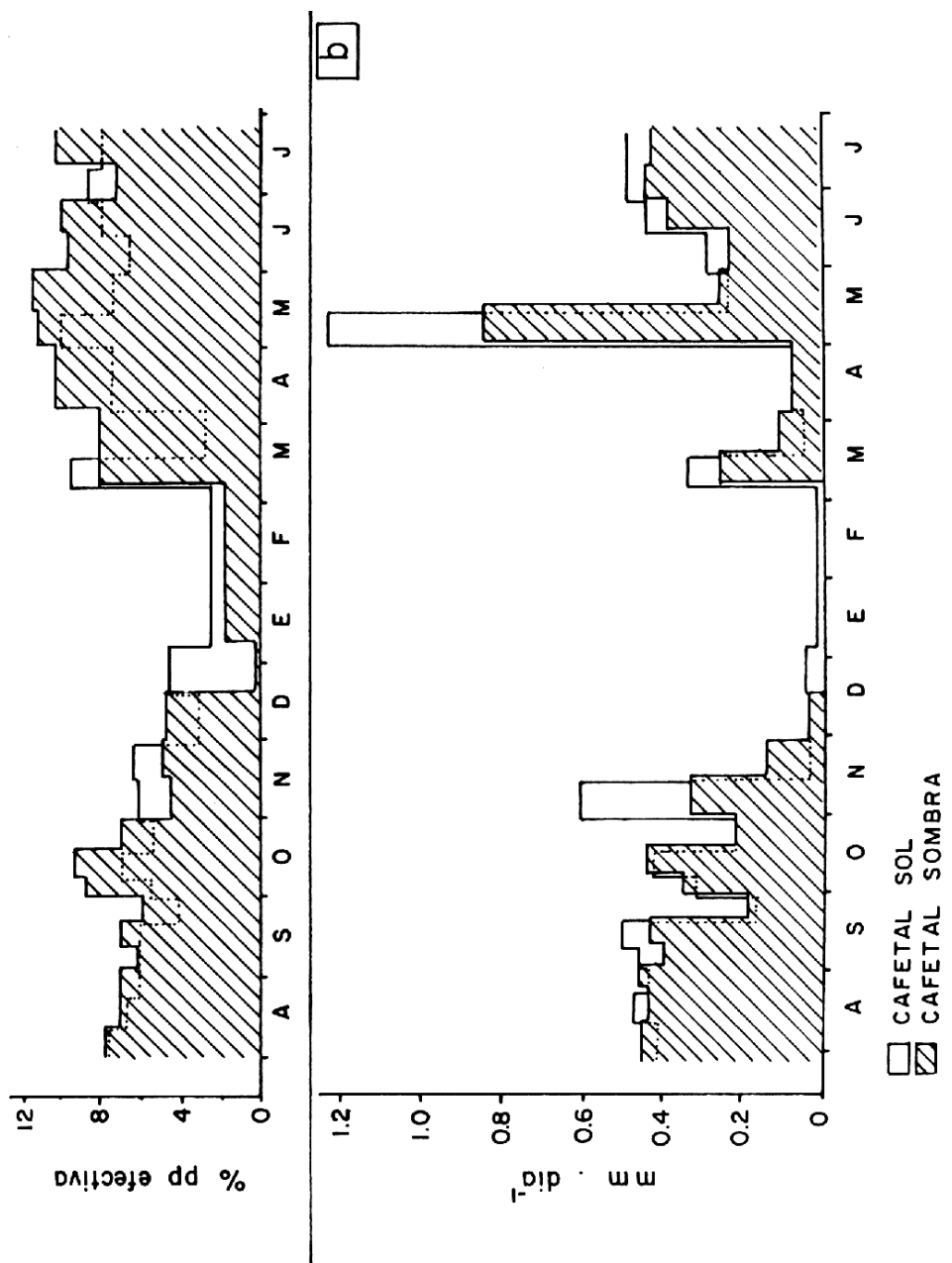


FIGURA VI-11 : Drenaje superficial, a) % de la precipitación efectiva

las mismas aunque los valores absolutos difieren muy poco. En el cafetal de sol sobresale este drenaje en los momentos en que la precipitación tiene puntos máximos, pero incluso en estos casos la escorrentía en el de sombra es proporcionalmente mayor. Esto significa que los valores anuales un poco mayores en el cafetal de sol son así sólo porque los valores de precipitación efectiva son mayores y no porque las condiciones en la superficie del suelo lo favorezcan. Esto es sumamente interesante porque significa a su vez que en el cafetal de sombra algo está facilitando el drenaje superficial y al examinar las condiciones de superficie en cada caso la diferencia más notable es la mayor proporción de hojarasca en el cafetal de sombra. Sin embargo, esto no tendría sentido si la hojarasca opera como una esponja que retiene humedad: para probarlo mostramos la Figura VI-11a. Si la hojarasca actuara reteniendo agua entonces la proporción escurrida con respecto a la que llegó (precipitación efectiva) debería ser menor en el cafetal de sombra que en el de sol. Pero vemos que esto no es así, más aún, la proporción escurrida es mucho mayor en el cafetal de sombra.

La situación durante la época seca es al contrario de lo descrito: el drenaje superficial en el cafetal de sombra es casi inexistente y su proporción respecto a la precipitación efectiva es mucho menor que en el cafetal de sol.

Interpretando en conjunto las observaciones anteriores podemos dar una visión de las condiciones de superficie y en especial del papel de la hojarasca. En el cafetal de sombra, donde hay una buena masa de hojarasca en superficie, ésta absorbe

una parte del agua de precipitación y luego de quedar embebida actúa como un techo con respecto al suelo facilitando que el agua escurra por sobre la masa de hojas, pero al llegar la época seca y comenzar a secarse, la hojarasca está nuevamente en condiciones de absorber agua más que de escurrirla y entonces la poca agua que llega se queda retenida en ella disminuyendo el drenaje hasta hacerlo cero eventualmente. En los primeros aguaceros fuertes que siguen a esta situación, la hojarasca se satura de nuevo de agua y comienza a actuar otra vez como un techo: esto se observa en la respuesta de la escorrentía a mediados de marzo, cuando después de unas lluvias importantes la proporción de agua escurrida en el cafetal de sombra es menor que en el de sol e inmediatamente después, al frenar el agua que la traspasa, el escurrimiento en el cafetal de sombra se hace proporcionalmente mayor manteniéndose así toda la época lluviosa.

Sin embargo, la menor proporción de infiltración en el cafetal de sombra no significa que debamos esperar una menor humedad del suelo ya que, por un lado, si la hojarasca frena la entrada en un sentido también debe cumplirse en el sentido contrario frenando la evaporación superficial; y por otro lado, el balance hídrico indica que cuanto mayor es la precipitación efectiva mayor es la infiltración.

El análisis de la Figura VI-11 nos revela otro hecho importante: en el cafetal de sol, donde hay poca interferencia en superficie, se observa que existe siempre escorrentía, incluso para valores tan bajos como 0,03 mm diarios de precipitación

total (Muestreo 1, no incluido en este trabajo), lo cual debe ser consecuencia de la fuerte pendiente. Sin embargo, para ese mismo lapso los valores en el cafetal de sombra están por debajo del límite de apreciación de los aparatos de medida y en consecuencia creemos que ese puede considerarse como el umbral de escorrentía en este cafetal:

MUESTREO 1: 09-02-88 al 04-03-88

	pp total mm	pp efectiva mm	escorrentía mm
cafetal sombra	0,78	0,72	0,008
cafetal sol		0,81	0,030

Si revisamos el balance de los datos para las épocas seca y lluviosa (Figuras VI-8 y VI-9), la proporción de agua escurrida es menor en la época seca en ambos cafetales, lo que puede interpretarse como consecuencia de la mayor capacidad de la hojarasca y del suelo de absorber buena parte de la poca agua que le está llegando (ver valores absolutos). En consecuencia, la proporción de agua restante es mucho mayor en la época seca que en la húmeda. Naturalmente que si consideramos los valores absolutos, las cantidades en cada compartimiento son menores en la época seca.

5. CONSIDERACIONES SOBRE EL BALANCE HIDRICO

Ya hemos aclarado que en esta etapa del trabajo sobre los agrosistemas cafetaleros no nos es posible hacer un balance hidrico completo, sin embargo, disponemos de elementos suficientes para hacer una evaluación preliminar.

Los compartimientos que creemos importantes a evaluar en el análisis del balance hidrico se encuentran esquematizados en la figura VI-12. En ese esquema también están indicados los flujos de agua más importantes en el balance. Los valores de entradas y salidas han sido indicados en esa Figura con letras de A a J.

Como entradas de agua al sistema consideramos la precipitación total (A), que se mide utilizando los pluviómetros descubiertos (sin cobertura vegetal), la precipitación efectiva parcial (B_1) que se mide en ambos cafetales con los pluviómetros a 10 cm del suelo. Los colectores de tronco en cafetos y árboles del dosel permiten calcular el agua extra que llega al suelo por escurrimiento de las ramas (B_2). La entrada adicional por riego (J) no existe en los cafetales bajo estudio. Todos estos compartimientos han sido medidos y ya hemos discutido los resultados.

Con respecto a las salidas de agua, solamente medimos las de drenaje superficial y drenaje oblicuo del suelo. La escorrentía (drenaje superficial (D)) y el drenaje oblicuo (H) los medimos con parcelas de erosión y de drenaje oblicuo construidas en cada uno de los dos cafetales.

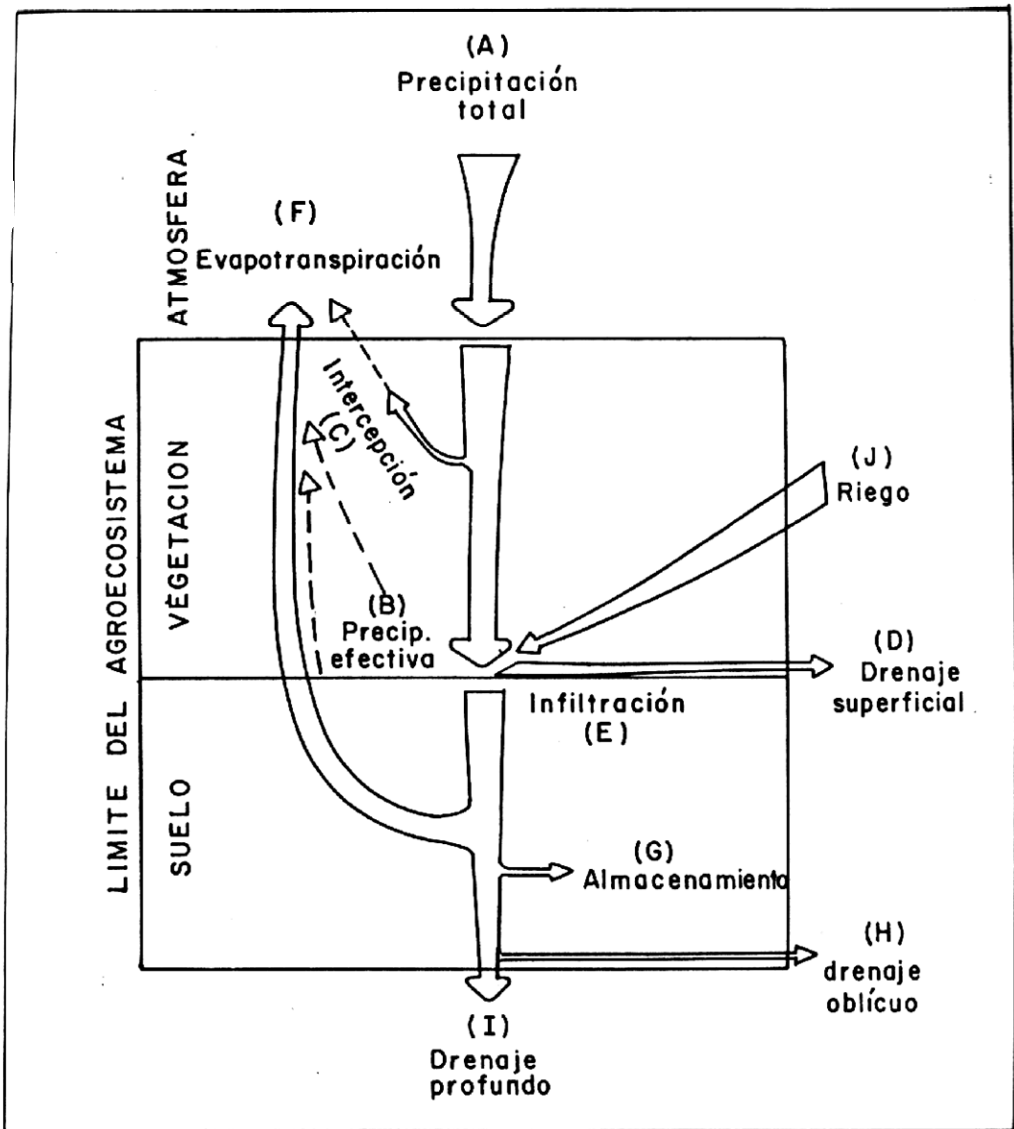


FIGURA VI-12: Esquema del balance hídrico en un agroecosistema cafetalero

TABLA VI-5 : Forma de medida y cálculo de los compartimientos del balance hídrico. Las siglas corresponden a Figura VI-12.

COMPARTIMIENTOS MEDIDOS	FORMA DE MEDIDA
A:precipitación total	pluviómetros a campo abierto
B ₁ :precipitación efectiva parcial	pluviómetros a 10 cm del suelo
B ₂ :escurrimiento troncos	colectores de tronco
D:drenaje superficial	parcelas de erosión
G:almacenamiento suelo	método gravimétrico, equivalencia a mm de pp
H:drenaje oblicuo	parcelas de drenaje oblicuo

COMPARTIMIENTOS CALCULADOS	FORMA DE CALCULO
B:precipitación efectiva	$B = B_1 + B_2$
C:intercepción	$C = A - B$
E:infiltración + evaporación superficial + retención superficial	$E = B - D$
F:evapotranspiración	fórmula García & Lopez
I:drenaje profundo	$I = A - D - G - H - F$

El agua retenida en el suelo (G), al no poder hacer registros continuos, se conoce midiendo el contenido de humedad de muestras de suelo, haciendo su equivalencia en mm de precipitación para cada día de muestreo y luego por diferencia con los valores del muestreo anterior se estima la cantidad aumentada o perdida en el lapso en cuestión.

Para completar el balance sería necesario tener por lo menos buenas medidas de drenaje profundo que permitieran a su vez hacer cálculos más ajustados de evapotranspiración. Hasta ahora no hemos podido instalar lisímetros pero esperamos que esto pueda hacerse pronto. Mientras tanto, y para tener desde ya una idea de las magnitudes esperables en los compartimientos no medidos, es decir una primera aproximación al balance hidrico, hemos realizado cálculos utilizando fórmulas empíricas de evapotranspiración y hemos estimado por diferencia el drenaje profundo (TABLA VI-5).

De la Figura VI-7 se deduce que los valores no explicables por intercepción ni drenaje superficial son: 81,32% para el cafetal de sol y 73,43% para el de sombra. Esto es una proporción muy grande de la precipitación total que debe ser explicada por: a) evapotranspiración, b) almacenamiento en el suelo, c) drenaje oblicuo y/o d) percolación (drenaje profundo). De ellos sólo estamos midiendo el almacenamiento en el suelo y drenaje oblicuo.

5.1. El agua en el suelo:

Por el método gravimétrico ya descrito podemos conocer el

porcentaje de agua en los distintos horizontes del suelo. Desafortunadamente, este método sólo permite medidas puntuales en el tiempo, que no son acumulativas. Pero si medimos la densidad aparente de cada horizonte podemos calcular a partir de esas dos medidas la cantidad de agua en su equivalente a mm de precipitación ($l.m^{-2}$ de superficie). Los resultados se encuentran en el ANEXO 3 y la Figura VI-13.

En la Figura VI-13 se muestra la variación anual del contenido de agua en el suelo, en los tres niveles considerados. Se nota que el comportamiento del agua en esos niveles es muy distinta en ambos cafetales. Analicemos primero el cafetal de sombra: queda claro que en todo momento el contenido de agua disminuye en profundidad, los 10 primeros cm contienen mucha más agua que los siguientes 10 y estos a su vez que los 10 más profundos. La diferencia entre el primero y el segundo es de 3,4 mm durante la época seca y 4,0 mm durante la lluviosa, mientras que entre el segundo y el último es de 3,3 mm en la época seca y 3,7 mm en la lluviosa, es decir que las diferencias entre niveles son las mismas y entre una época y otra sólo difieren en 0,5 mm (TABLA VI-6). Esto indica que a medida que se aumenta en profundidad: a) aumenta la pérdida por absorción por las plantas o b) el drenaje es mayor; esto último tiene más sentido ya que las raíces disminuyen en profundidad y mal podrían aumentar la absorción, pero en cambio se observa un aumento de pedregosidad en esa dirección.

En el cafetal de sol los primeros 10 cm también muestran todo el año un contenido mayor de humedad, pero la diferencia

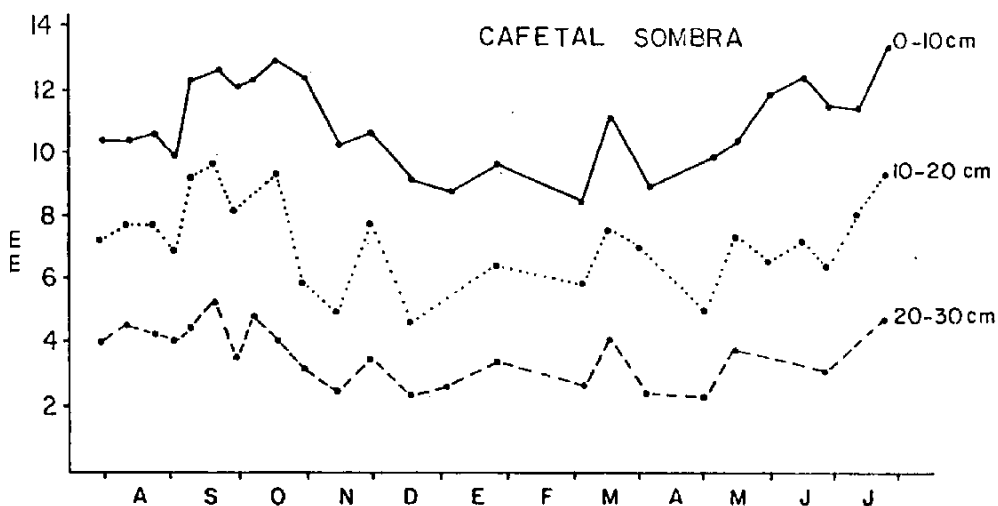
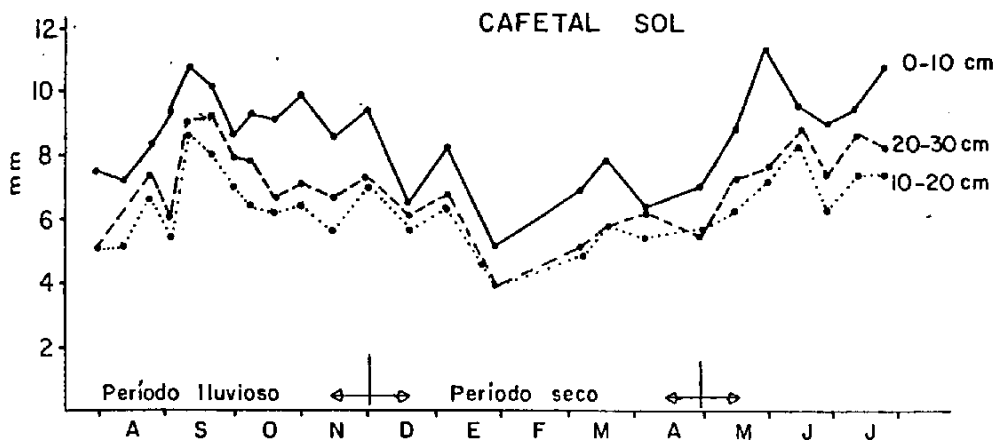


FIGURA VI-13: Contenido de agua en el suelo a tres profundidades.

todo el año un contenido mayor de humedad, pero la diferencia entre este y el contenido de los otros dos niveles es mucho menor que en el cafetal de sombra: con el segundo nivel es de 1,4 mm en la época seca y 2,5 mm en la lluviosa y con el último de 1,1 mm en la época seca y de 1,7 mm en la época húmeda. Esto es porque el nivel de 20-30 cm es un poco más húmedo que el de 10-20 cm, pero no mucho más sólo 0,3 mm en la época seca y 0,8 mm en la época lluviosa, pero estas diferencias no son significativas de modo que los dos últimos niveles funcionan como uno solo (TABLA VI-6).

TABLA VI-6 : mm de agua retenida en el suelo, promedio por épocas.				
nivel cm	CAFETAL SOMBRA		CAFETAL SOL	
	epoca seca	epoca lluviosa	epoca seca	epoca lluviosa
0-10	9,60	11,66	7,00	9,27
10-20	6,17	7,67	5,62	6,74
20-30	2,92	3,97	5,90	7,54

Al comparar los dos cafetales resalta el hecho de que los primeros 10 cm del cafetal de sombra son mucho más húmedos que los del cafetal de sol. Los siguientes dos niveles para el cafetal de sol muestran el mismo contenido de agua y no se diferencian en la época lluviosa del segundo nivel del cafetal de sombra, pero en cambio tienen valores menores durante la época seca. Esto concuerda con nuestra interpretación de que el estrato superficial tiene una protección contra la evaporación de superficie en el cafetal de sombra, lo cual es cierto debido a su

mayor capa de hojarasca; parte de su papel en superficie ya fue discutido (capítulo anterior), pero en especial es oportuno señalar que varios autores se han preocupado por medir el comportamiento de la hojarasca bajo procesos de evaporación: Lemee & Fardjah (1980) mostraron que en un suelo con hojarasca ella es la que sufre los procesos de evaporación mientras que para el suelo inmediatamente debajo las pérdidas de agua se relacionan con la absorción; Bignand (1978) por su parte mostró que con respecto al proceso de evaporación la hojarasca se comporta como un suelo desnudo. Por el contrario, la superficie del suelo en el cafetal de sol se encuentra sometida a mayor radiación y es más seca. Pero este efecto parece no ir más allá de los 10 cm ya que el estrato de 10 a 20 cm coincide con el del cafetal de sombra. Este importante papel de la hojarasca como intermediario de la evaporación y la incorporación de agua al suelo no nos permite hacer una relación directa entre la infiltración (inf) como:
$$\text{inf} = \text{Pet} - \text{Ds}$$
(recordemos que Pet:precipitación efectiva y Ds:drenaje superficial).

Esta concentración de humedad en superficie en el cafetal de sombra explica la gran densidad de raíces de cafeto en la parte superior de este nivel donde, según la bibliografía (capítulo I) se concentra la masa de raíces absorbentes. En este sentido, en el cafetal de sol las raíces absorbentes deben bajar un poco en profundidad buscando una zona menos seca y esto es realmente lo que ocurre: para una superficie de 46,6 cm² los distintos niveles tienen los siguientes g de raíces de café:

nivel cm	cafetal sombra		cafetal sol	
	g	s	g	s
0-10	2,2	0,50	0,4	0,69
10-20	0,7	0,36	1,0	0,47
20-30	0,3	0,06	0,6	0,87

s: desviación típica

La similitud entre los dos últimos niveles en el cafetal de sol parece consecuencia de que, a pesar de la profundidad, son parte de un mismo horizonte genético.

Las oscilaciones en el cafetal de sombra son menores, sobre todo en el nivel más profundo, lo que sugiere una mayor capacidad amortiguadora en ese cafetal. Esto es sólo una constatación de algo bien conocido pero que no está de más señalar.

5.2. Drenaje oblicuo:

Como ya mencionamos, en nuestro caso la medida de drenaje oblicuo no corresponde a movimientos dentro de distintos horizontes sino del perfil útil para el café que corresponde al horizonte A el cual se apoya directamente sobre un horizonte C desarrollado "in situ" donde los trozos de roca original ocupan casi todo el volumen.

Para interpretar los resultados debemos recordar la advertencia que hace Roose (1981) sobre las alteraciones que pueden generar el poner límites físicos (como láminas enterradas) cuando se hace este tipo de medida. Creemos que la principal alteración puede deberse a la ruptura de la lámina de agua

capilar en el momento en que deja de llover y el agua que drena dentro del suelo va dejando tras de sí un vacío que en casos de suelos poco porosos puede ejercer una succión en contra de su movimiento. Sin embargo, 1) el suelo en el que estamos trabajando es muy poroso de modo que ese efecto se ve disminuido y 2) entenderemos que hay una subestimación de esa medida cuando la humedad del suelo disminuya mucho alejándose demasiado del punto de saturación. Cubierto esto, los datos dan buena información.

En el ANEXO 1 están los resultados de estas medidas. En la TABLA VI-7 mostramos un resumen:

TABLA VI-7: Drenaje oblicuo; valores absolutos y % de la precipitación total				
período	cafetal mm	sombra %	cafetal mm	sol %
lluvioso	0,9874	0,07	1,9706	0,13
seco	0,2674	0,11	1,4852	0,62
TOTAL	1,2568	0,07	3,4558	0,20

Esta cifras son de una proporción tan baja dentro del balance anual que son despreciables. Pero es interesante saber que a ese nivel no hay agua siguiendo la inclinación de la pendiente a pesar de que el límite de ese horizonte sigue esa inclinación: esto indica dos cosas, la primera que una vez dentro del suelo el agua no tiene nada que ver con el grado de pendiente de la superficie y que por lo tanto se mueve fundamentalmente en sentido vertical hacia abajo y la segunda que el horizonte siguiente (horizonte C) es más permeable que el anterior (horizonte A).

La primera observación, la del sentido vertical del movimiento del agua, nos indica que unos lisímetros abiertos colocados a ese nivel deben funcionar bien para las medidas de drenaje profundo, pues ya sabemos cuanto es la pérdida por movimiento lateral.

5.3. Evapotranspiración:

A estas alturas sólo quedan dos procesos por los que se pierde agua para el sistema: evapotranspiración y drenaje profundo. Ya hemos comentado que no tenemos medidas para el drenaje profundo, pero como queremos una primera aproximación al balance hídrico hemos calculado la evapotranspiración valiéndonos de dos fórmulas empíricas: una ampliamente usada y conocida, la fórmula de Thornthwaite, y la otra que se diseñó para ambientes tropicales utilizando sobre todo estaciones venezolanas y que promete ser más adecuada a nuestro medio que la mayoría de las utilizadas mundialmente, la fórmula de García & Lopez. Por definición, ambas fórmulas estiman la evapotranspiración general del área, sin embargo, dado que nuestro interés es poder diferenciar esa pérdida de agua en los dos cafetales, hemos adaptado la fórmula de García & Lopez calculándola con datos de temperatura y humedad relativa tomados dentro de cada cafetal. Aunque esta forma de operar no es la más correcta creemos que puede dar una información más cercana a la que queremos.

Hemos instalado un termohigrógrafo en cada cafetal a la misma altura, diferenciando las condiciones bajo las cuales

ocurre en cada caso la transpiración de los cafetos y la evaporación. Se entiende que en el caso del cafetal de sombra se deja por fuera la transpiración de los árboles sombreantes y del follaje superior de los cafetos de sol pero esta subestimación no debería ocurrir en el caso de la fórmula de Thornthwaite, mucho más generalista, y entonces podemos decir que la evapotranspiración debería estar entre los valores de estas dos fórmulas.

Las Figuras VI-14 y VI-15 muestran la curva anual para las dos fórmulas y su relación con el contenido de agua no explicado por los demás compartimientos del balance hídrico.

Vemos que la diferencia entre los valores de las dos fórmulas no es muy grande. Durante la época lluviosa los valores según fórmula de Thornthwaite se ajustan mejor con la de García & López para el cafetal de sol, lo cual tiene sentido pues es en ese cafetal donde las condiciones climáticas son menos modificadas por la vegetación. En la época seca la fórmula de García & López muestra valores mayores pero para nuestro propósito esto no es muy importante ya que la evapotranspiración real viene dada por el agua disponible, la cual es menor que la potencialmente evapotranspirable.

Notamos que los valores de evapotranspiración para el cafetal de sol son siempre mayores, lo cual era lógico de esperar, pues en el cálculo de la fórmula de García & López hemos utilizado datos provenientes de debajo del dosel de árboles sombreantes en el cafetal de sombra pero en ambos cafetales el

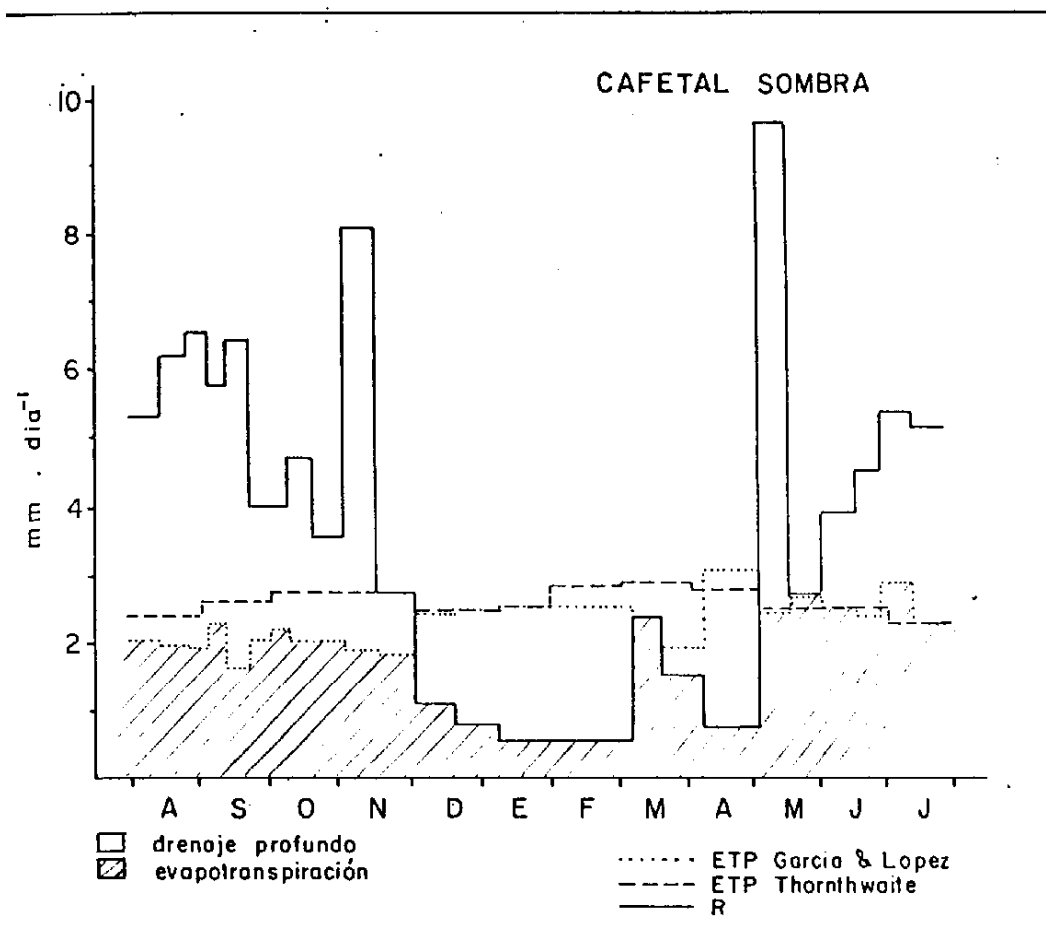


FIGURA VI-14: Estimación de drenaje profundo y evapotranspiración a partir de formulas empíricas: cafetal de sombra. $R = pp \text{ total} - \text{drenaje superficial} - \Delta \text{ suelo} - \text{drenaje oblicuo}$.

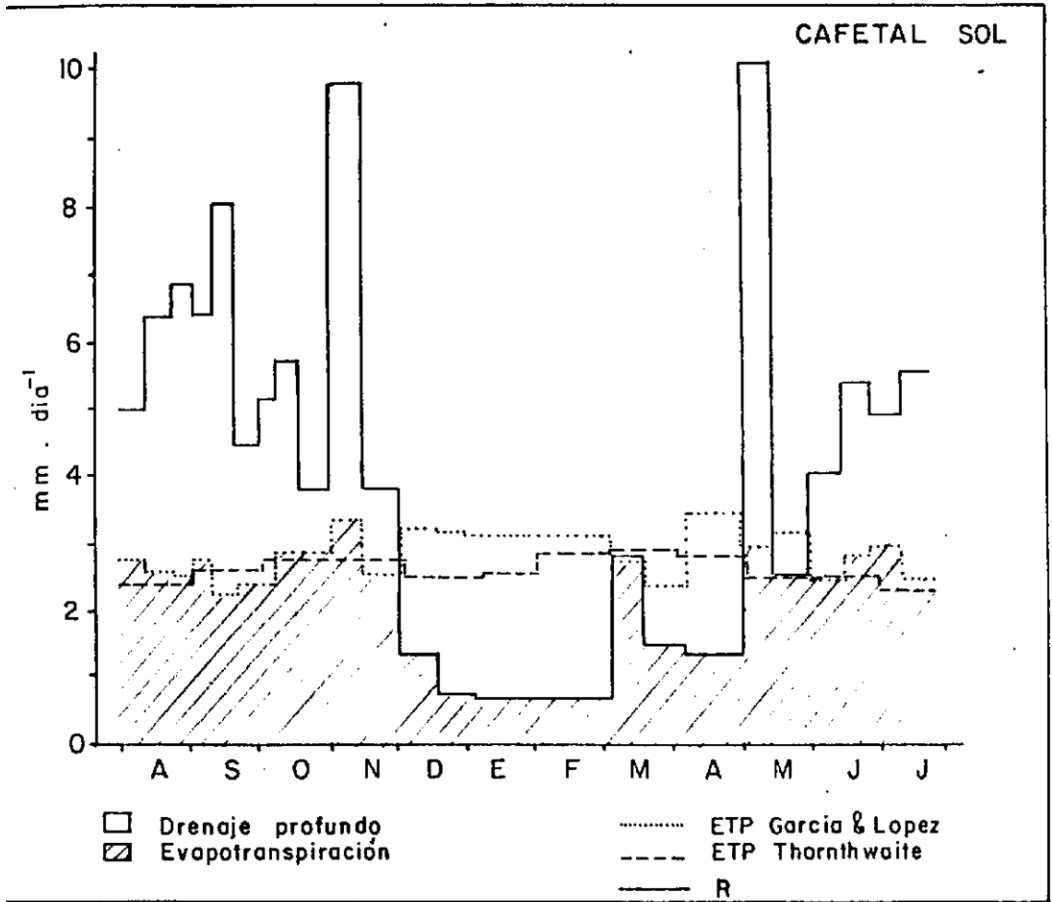


FIGURA VI-15: Estimación de drenaje profundo y evapotranspiración a partir de fórmulas empíricas.
 $R = pp \text{ total} - \text{drenaje superficial} - \Delta \text{ suelo} - \text{drenaje oblicuo.}$

termohigrógrafo está a la altura de los cafetos y no debajo de ellos, esto significa que la disminución de evapotranspiración calculada en el cafetal de sombra se debe solo al efecto de los árboles, ya que lo que se ha evaporado por intercepción de los cafetos está incluido en los cálculos de ETP. En apoyo a esta afirmación tenemos que al sumar la intercepción de los árboles a estos valores de ETR, su semejanza con los del cafetal de sol es muy grande. En la TABLA VI-8 vemos cuanto significa esto en mm de agua.

Desafortunadamente, ninguna fórmula puede tener en cuenta el tipo de vegetación y la hojarasca y es precisamente el verdadero papel de ambas en la pérdida de agua lo que los lisímetros nos permitirán evaluar en una próxima etapa. Según Nizinski & Saugier (1988), la hojarasca tiene un papel importante en la evaluación de la evapotranspiración real por lo que la incluyen dentro de su modelo para bosques templados donde proponen que cuando la hojarasca está suficientemente húmeda la evaporación real disminuye en función de la raíz cuadrada del tiempo.

No creemos oportuno extendernos en explicaciones basadas en los valores de las TABLA VI-8 pues sería caer en especulaciones. Sólo queremos resaltar dos cosas: una, que el drenaje profundo, que ha sido calculado por diferencia del resto de los valores, pudiera ser sustancialmente mayor sobre todo en el cafetal de sombra donde la porosidad del suelo es muy grande. Considerando esta característica del suelo, la capa protectora de hojarasca que disminuye la evaporación y la deciduidad del café y de los árboles sombreantes lo cual disminuye la transpiración, esperamos

TABLA VI-8: Evapotranspiración y drenaje profundo en ambos cafetales

CAFETAL DE SOMBRA					
época	R mm	ETR mm	ETR* mm	ETR** mm	Drenaje profundo mm
lluviosa	1370,28	439,99	534,70	220,92	835,58
seca	228,76	182,55	213,00	173,30	15,76
TOTAL	1599,67	622,54	747,70	393,59	851,34

CAFETAL DE SOL				
época	R mm	ETR mm	ETR** mm	Drenaje profundo mm
lluviosa	1357,19	541,50	328,73	825,69
seca	227,97	201,21	194,20	26,76
TOTAL	1595,16	742,71	522,93	852,45

$R = pp \text{ total} - \text{drenaje superficial} - \text{suelo} - \text{drenaje oblicuo}$

ETR : evapotranspiración real según García & Lopez

$ETR^* = ETR \text{ según García \& Lopez} + \text{intercepción Inga}$

$ETR^{**} = ETR \text{ según García \& Lopez} - \text{intercepción total}$
 $= \text{evaporación suelo} + \text{transpiración}$

En este trabajo se consideró:

- ETR = ETP cuando $R > ETP$
- ETR = R cuando $R \leq ETP$
- Drenaje profundo = $R - ETR$

que la ETR en el cafetal de sombra sea mucho menor que la calculada para la época seca; no así en el cafetal de sol.

5.4. Sobre el balance hídrico:

Para terminar esta parte quisiéramos mostrar en conjunto los resultados referentes al balance hídrico.

Las Figuras VI-16, VI-17 y VI-18 muestran el balance preliminar para todo el año y para las épocas seca y lluviosa.

Se puede observar que los compartimientos de intercepción, precipitación efectiva parcial y escurrimiento de troncos son dependientes de: 1) del monto de las precipitaciones y 2) de la cobertura vegetal. El efecto combinado de ambas da las siguientes situaciones y el correspondiente cambio en los compartimientos mencionados:

		pp total	
		alta	baja
cobertura	alta	plena época lluviosa ----- intercepción: ++ escurr. tronco: + ∴ pp efectiva: -	transición lluviosa-seca ----- intercepción: + escurr. tronco: ++ ∴ pp efectiva: +
	baja	transición seca-lluviosa ----- intercepción: + escurr. tronco: ++ ∴ pp efectiva: +	plena época seca ----- intercepción: - escurr. tronco: - ∴ pp efectiva: ++

CAFETAL SOMBRA

CAFETAL SOL

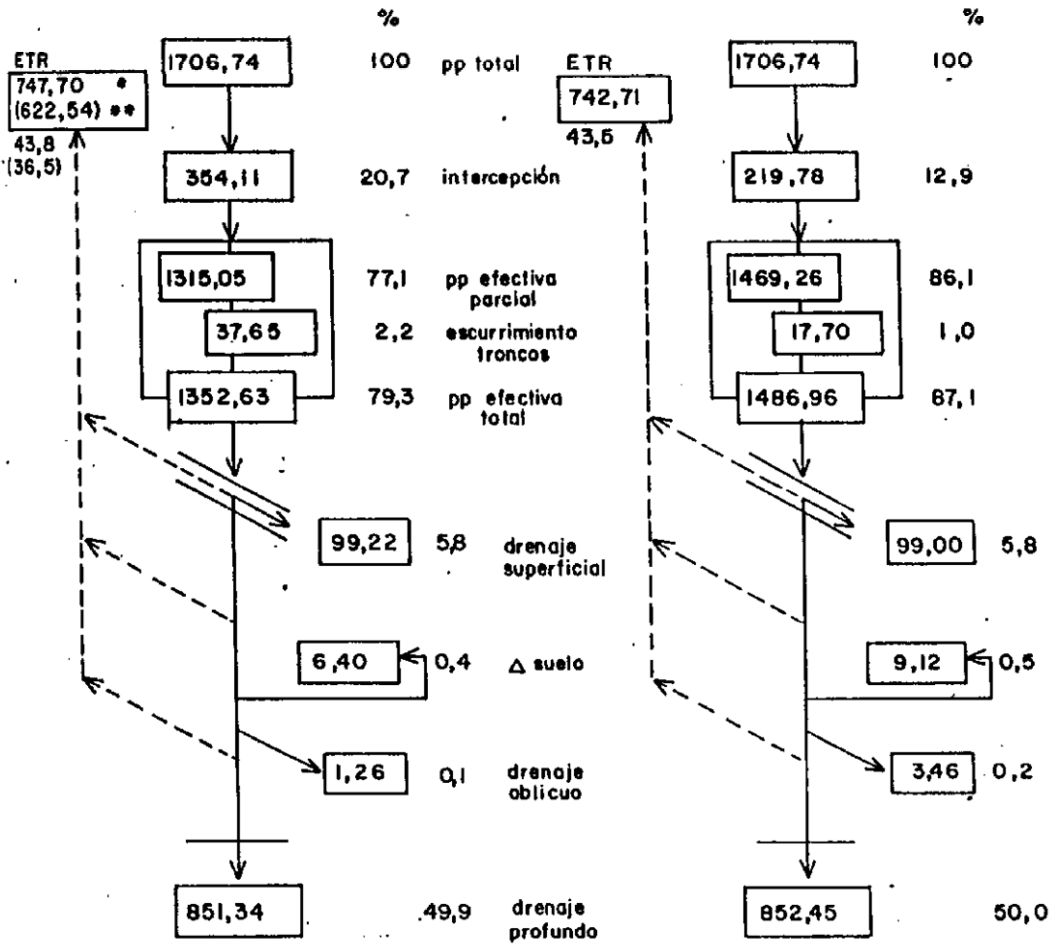


FIGURA VI-16: Balance hidrico anual preliminar lapso 27-07-88 al 24-08-89
 Dentro de las casillas: valores absolutos en mm
 Fuera de las casillas: % de precipitación total
 *: incluye intercepción total
 **: no incluye intercepción Inga oerstediana

CAFETAL SOMBRA

CAFETAL SOL

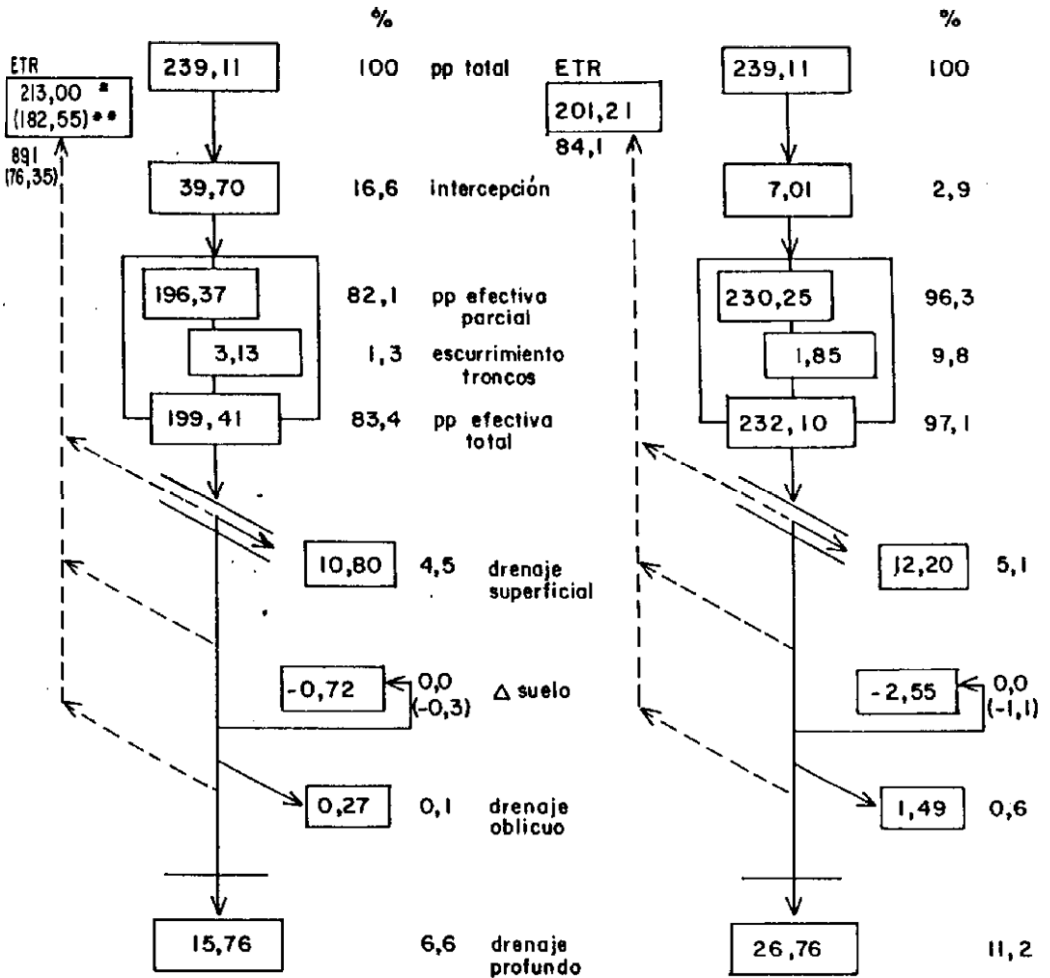


FIGURA VI-17: Balance hidrico preliminar periodo seco
 Dentro de las casillas: valores absolutos en mm
 Fuera de las casillas: % de precipitación total
 *: incluye intercepción total
 **: no incluye intercepción Inga oerstediana.

CAFETAL SOMBRA

CAFETAL SOL

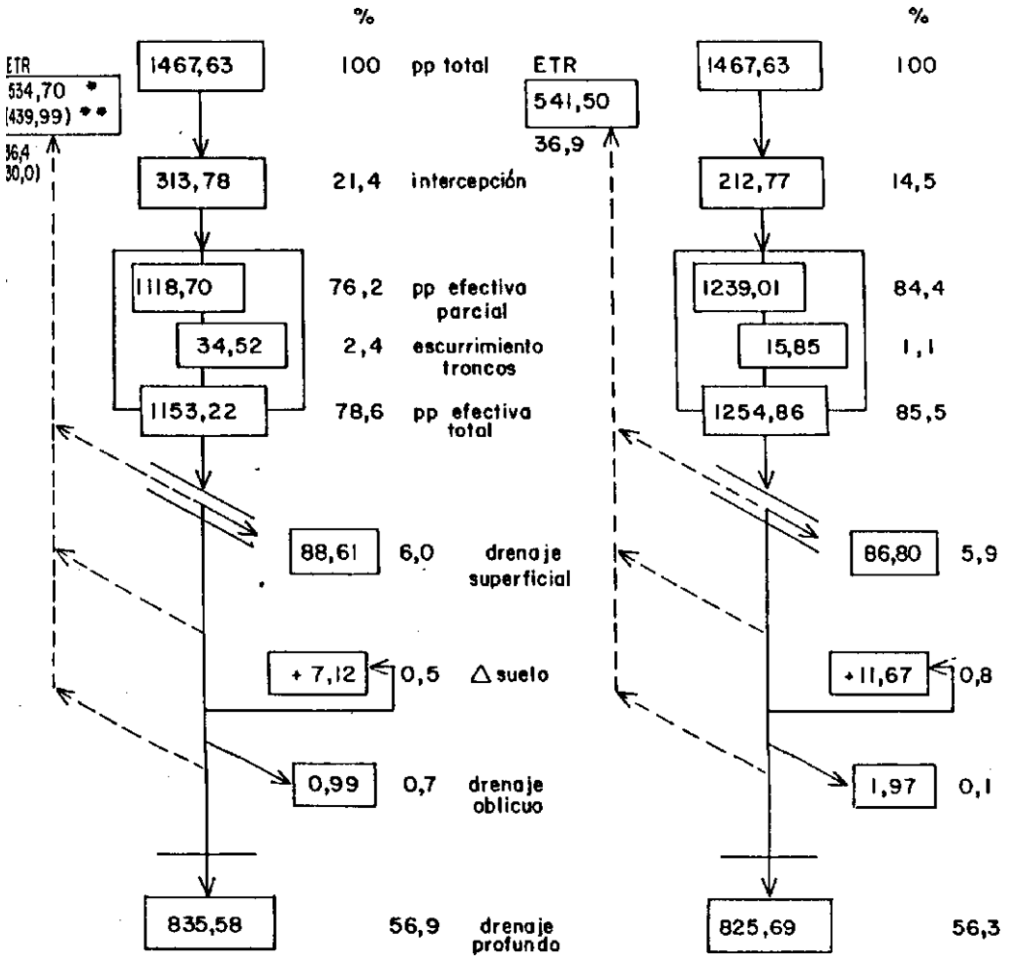


FIGURA VI-18: Balance hidrico preliminar periodo lluvioso
 Dentro de las casillas: valores absolutos en mm
 Fuera de las casillas: % de precipitación total
 * : incluye Intercepción total
 ** : no incluye intercepción Inga oerstediana.

El drenaje superficial depende del efecto tampón de la hojarasca, de la precipitación efectiva total, de la pendiente y de la permeabilidad del suelo, en nuestro caso la pendiente es la misma en ambos cafetales y ambos tienen suelo permeable. En esas condiciones, el drenaje superficial aumenta con la hojarasca y con la precipitación efectiva: en el cafetal de sombra es mayor la hojarasca y en el de sol es mayor la precipitación efectiva, en el balance anual estos factores se compensan. En realidad la precipitación efectiva siempre es mayor en el cafetal de sol, pero por efecto de la hojarasca el drenaje superficial disminuye en la época seca (la hojarasca retiene parte del agua) y aumenta en la lluviosa (hojarasca saturada).

La cantidad de agua disponible para penetrar en el suelo es mayor en el cafetal de sol que en el de sombra, y así los compartimientos bajo tierra del cafetal de sol tienen montos mayores que en el de sombra.

La evapotranspiración en el cafetal de sombra es menor en la época lluviosa, pero mayor en la época seca dado que los árboles interceptan una proporción importante de la precipitación. Aunque en general los valores de ETR son semejantes en ambos cafetales, en el de sombra el 47% de ese valor es debido a la interceptación, mientras en el de sol la interceptación solo explica el 30%, es decir que la evaporación del suelo y la transpiración son mayores en el cafetal de sol.

6. INCORPORACION Y ARRASTRE DE HOJARASCA

La hojarasca ha mostrado ser un elemento muy importante en el balance hídrico y sin duda representa un importante banco de nutrientes. En este trabajo nos referiremos a su incorporación, su arrastre y haremos alusión a la variación de su monto sobre el suelo.

6.1. La caída de hojarasca:

Durante el transcurso del año, cierta cantidad de material vegetal se desprende de la biomasa aérea viva y cae sobre el suelo. Ese desprendimiento varía en cantidad, tipo y calidad dependiendo de la época en que ocurre y es necesario conocerlo por la importancia que este material tiene en especial para el ciclaje de nutrientes dentro del sistema. En este trabajo analizamos la caída de esta hojarasca en los dos cafetales haciendo énfasis en la cantidad y separando dos tipos: 1) hojarasca de café y 2) hojarasca de otras especies. En cada uno de estos dos tipos quedan incluidos: hojas jóvenes, maduras y senescentes, trozos de ramas, flores y frutos; el análisis de estas categorías y su papel en la incorporación de distintos nutrientes al suelo queda para un trabajo posterior.

En las Figuras VI-19 y VI-20 se muestra el aporte de hojarasca a lo largo del año. Estos resultados indican que:

- 1) existen aportes de hojarasca tanto de café como de otras especies todo el año

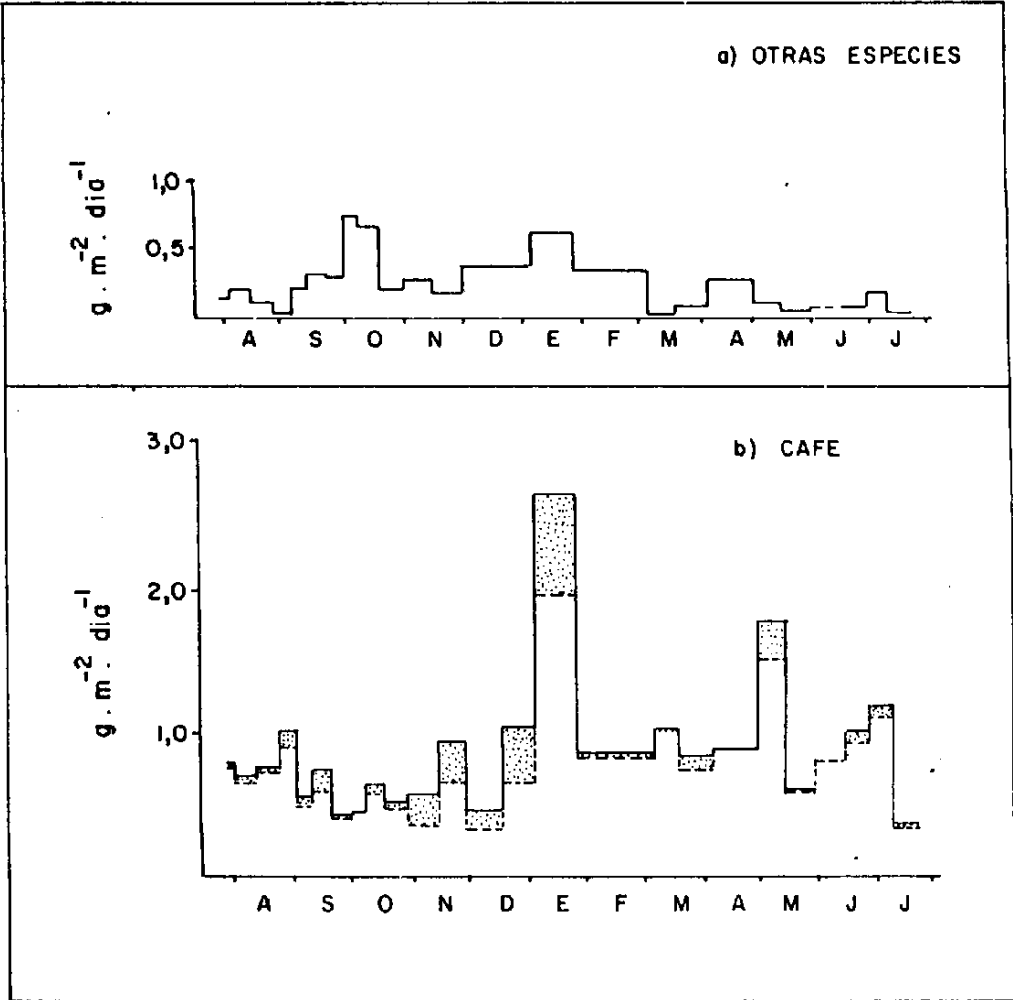


FIGURA VI-19: Caida de hojarasca en cafetal de sombra
 Area punteada: frutos café

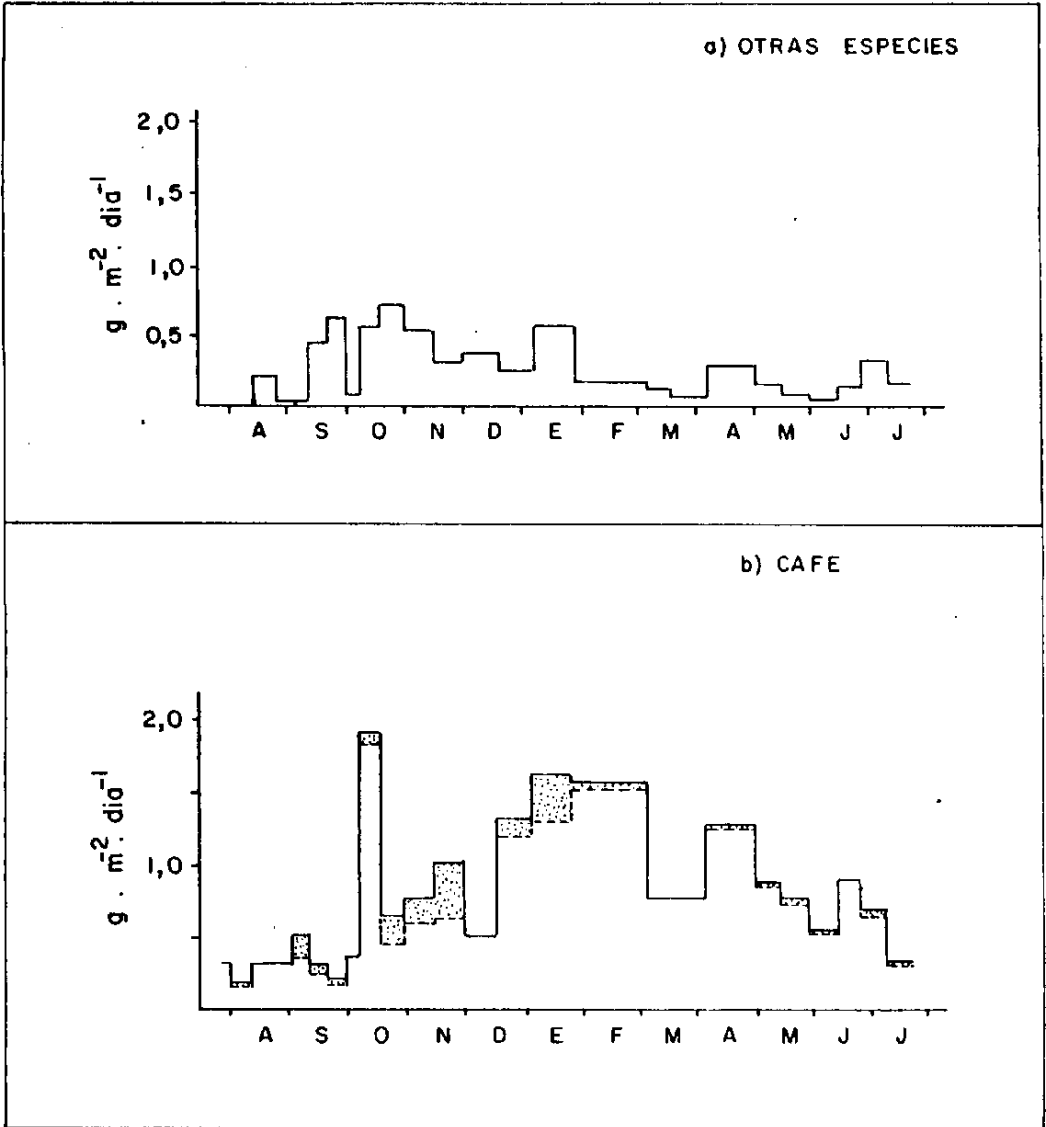


FIGURA VI - 20 : Caída de hojarasca en cafetal de sol.
 Area punteada: frutos café.

(2) el aporte por parte del café es mucho mayor que el de otras especies, salvo a finales de la época lluviosa

(3) los mayores aportes de hojarasca de café se concentran a comienzos de la época seca: esto no es sorprendente ya que este momento coincide con la fase fenológica de caída de hojas (capítulo IV) que acompaña la maduración de los frutos.

(4) otros picos de caída de hojarasca de café coinciden notablemente con grandes concentraciones de lluvia, como mayor exponente está el pico de principios de mayo: en ese momento el follaje de los árboles en el cafetal de sombra no se ha recuperado, de modo que no sirve de escudo contra el impacto del agua, y se observa para ambos cafetales que si bien en ese momento los cafetos tienen hojas nuevas estas sufren un desprendimiento importante indicando que son bastante susceptibles a ese efecto mecánico. Es así seguramente como se entiende su pérdida continua a lo largo del año: efecto mecánico de lluvia y movimiento de las personas para actividades agrícolas.

Es notable que en el cafetal de sombra la hojarasca de otras especies sea tan pequeña ya que los árboles sombreantes son de una especie que se distingue por grandes y pesadas hojas y cuyo fruto también es de buen tamaño; sin embargo ya hemos hecho referencia a que en los lugares originalmente escogidos los árboles de *Inga* sufrieron un problema que disminuyó enormemente la recuperación de su follaje y sus actividades reproductivas. Estimamos que en condiciones normales su aporte a la hojarasca general sea muy importante, de todas formas hemos instalado una réplica de los dispositivos (descritos en la metodología) en un

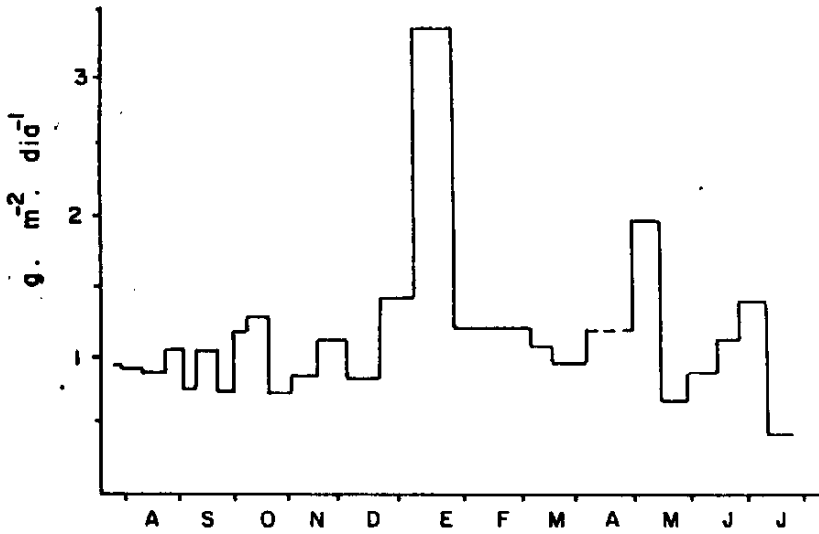
cafetal vecino donde los árboles sombreantes están en óptimas condiciones y cuyos resultados podrán discutirse dentro de algún tiempo.

Igualmente, llama la atención que en el cafetal de sol el aporte de especies distintas a café sea equivalente al del cafetal de sombra y en este caso la explicación viene dada por la caída continua de trozos de ramas secas de los restos de árboles muertos que están por todo el cafetal. Al contrario que en el cafetal de sombra donde la situación debe cambiar cuando los árboles se recuperen, aquí es de esperarse que cuando los restos muertos terminen de caerse esta categoría se vuelva muy pequeña.

Los frutos de café caen durante todo el año, aunque se nota un incremento en el lapso correspondiente a su maduración, el resto del tiempo se trata de frutos verdes o frutos madurados fuera de tiempo ya que a lo largo del año se encuentra una muy pequeña producción constante de flores y frutos maduros. La época de menor caída de frutos corresponde al lapso postmaduración, lo cual es perfectamente lógico pues es el lapso en el cual las plantas tienen el mínimo de frutos en cualquiera de sus estados. Es notable que la proporción (y el valor absoluto) de frutos en la hojarasca del cafetal de sol sea menor que el de sombra ya que produce mucho más.

La Figura VI-21 muestra la suma de todos los aportes para ambos cafetales. Para el cafetal de sol hemos marcado la línea que corresponde sólo a café para indicar la posible forma de la curva al desaparecer los restos de árboles.

a) CAFETAL SOMBRA



b) CAFETAL SOL

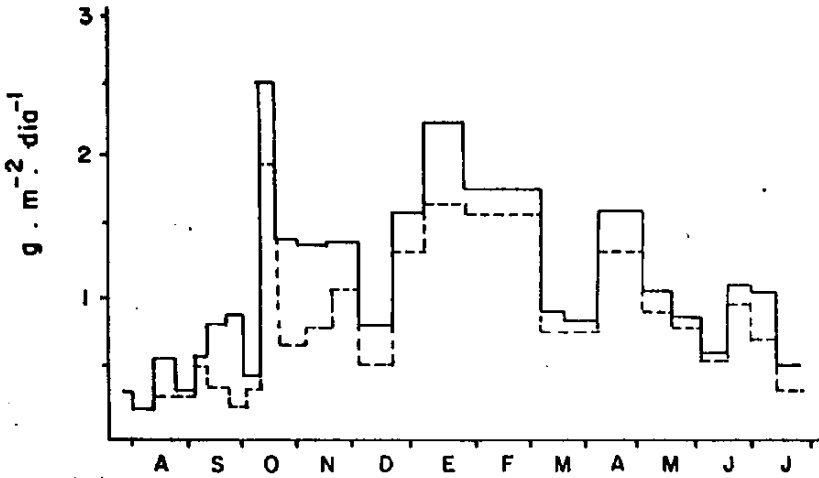


FIGURA VI- 21: Total hojarasca caída
Linea punteada: solo café.

Si relacionamos la caída de hojarasca con las fenofases en las que ésta debería producirse en mayor cantidad vemos lo siguiente: en el período de caída de hojas de *Inga* (enero, febrero) se recoge el 30% del total de hojarasca del año distinta de café; en el período de maduración de frutos y caída de hojas de café (noviembre, diciembre, enero, febrero) la hojarasca de café recogida corresponde al 39% en el cafetal de sombra y 48% en el de sol.

La TABLA VI-9 resume los valores absolutos de caída de hojarasca:

TABLA VI-9 : incorporación de hojarasca g.m ⁻² .año ⁻¹ (27-07-88/24-08-89)					
cafetal	café	otras especies	total caída	deshierbe	TOTAL
sombra	334,73	90,85	425,58	8,3	433,9
sol	318,68	95,19	413,87	237,0 *	650,9

! : el deshierbe menor al iniciarse el período lluvioso no pudo ser evaluado.

Los montos son bajos en relación con otros agroecosistemas cafetaleros de sombra (TABLA VI-10). Naturalmente que esto depende de las características del cafetal: de la densidad tanto de cafetos como de árboles sombreantes y de las especies de estos últimos. Ya hemos comentado que en el lapso estudiado los árboles de *Inga* han disminuido su actividad, siendo mínima su producción de hojas.

Sin embargo, el cafetal de sol presenta valores similares a los de la bibliografía incluso considerando el deshierbe: de los

TABLA VI-10 : hojarasca en cafetales

Kg.ha⁻¹.año⁻¹

K: constante de descomposición anual

localidad	cafetal	hojarasca incorporada	hojarasca suelo	K	autor
VENEZUELA:					
La Cumaca	sombra	11.159	1.963	4,82	(1)
			2.771		
Edo. Miranda	sombra	21.000			(2)
Canaguá	sombra	4.339	6.160	0,70	(3)
Edo. Mérida)	sol	6.509	4.380	1,49	(3)
COLOMBIA:					
Chinchiná	sombra	11.138		3,55	(4)
Chinchiná	sombra	17.465	4.914	2,27	(4)
Salancá	sombra	7.757	6.000	1,29	(5)
Popayán	sombra	10.076	7.855	1,28	(5)
Medellín	sombra	14.992	23.064	0,65	(5)
Chinacota	sombra	6.702			
Sevilla	sombra	4.882	11.455	0,43	(5)
Pasto	sombra	6.992	15.820	0,44	(5)
Colombia	sombra	10.000 a			(6)
		15.000			
MEXICO:					
Coatepec	mixto	9.260			(7)
"	sombra	8.467			(7)
"	sombra	7.470			(7)
"	sol	5.686			(7)

(1): Aranguren, 1979

(2): Delgado, 1935

(3): este trabajo

(4): Suarez de Castro, 1950

(5): Suarez de Castro, 1953

(6): Jenny et al, 1949

(7): Jimenez Avila, 1982

6686 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ medidos por Jimenez (1982) 3.420 corresponden a esa actividad.

La cantidad total de hojarasca sobre el suelo está directamente relacionada con la cantidad de hojarasca caída o incorporada por el hombre y la descompuesta. En distintos momentos del año el monto de hojarasca puede variar (sobre todo en función de la fenología de las plantas o de las actividades agrícolas), pero para una misma época, si el sistema es más o menos estable, las cantidades deben ser similares y en ese caso la incorporación debe ser a su vez similar a la descomposición. Por lo tanto si los montos de hojarasca en nuestros cafetales son equivalentes para épocas semejantes podríamos esperar que los montos descompuestos equivalieran a la incorporación.

Los datos que existen sobre cantidad de hojarasca en la misma época quizás no son suficientes pero dan una buena idea sobre la "acumulación" en superficie. Los presentamos en la TABLA VI-11; ellos muestran tres medidas en época seca y una a mediados de la lluviosa. Para los propósitos señalados anteriormente las únicas medidas coincidentes en la época son las de finales de enero principios de febrero: considerando que se trata de años distintos y que fueron tomadas con métodos diferentes los resultados son asombrosamente similares para ambos cafetales. Si tomamos esto como indicador de que los procesos en el año 1987 son equivalentes a los del año 1988 entonces los valores de incorporación de hojarasca pueden considerarse indicativos de los de descomposición, y se puede aventurar una predicción sobre la constante de descomposición K (difundida por

TABLA VI-11: Hojarasca acumulada sobre el suelo

CAFETAL SOMBRA, g.m⁻²

fecha	café	otras especies	fracción***	total
08-02-88 *	200,7	311,6	100,3	612,6
25-03-88 **	443	167	289	897
11-08-88 *	276,9	1416,1	406,9	2099,9
27-01-89 **	208	216	165	619

CAFETAL SOL, g.m⁻²

08-02-88 *	125,1	225,0	122,8	472,9
25-03-88 **	207	309	239	758
11-08-88 *	251,2	1266,6	129,2	1647,0
27-01-89 **	162	160	80	402

*: este trabajo

**: Redao, 1989

***: hojarasca fraccionada no diferenciable

Olson, 1963), donde:

K = tasa de caída / acumulación sobre el suelo

Asumiendo un equilibrio dinámico, tenemos que para el cafetal de sombra $K = (434/616) = 0,70$ y para el cafetal de sol $K = (651/438) = 1,49$. Son valores bajos comparados con muchos ambientes tropicales pero hay que recordar que estos cafetales están a 1770 m. Sin embargo, Aranguren (1979) calculó una $K = 4,82$ para un cafetal de sombra a 1380 m, 20°C. En la TABLA VI-10 se puede ver la relación con otros cafetales.

La TABLA VI-11 muestra, además, fluctuaciones importantes en la hojarasca del suelo. Aranguren (1979) encontró que no había una correspondencia clara entre el pico de caída de hojarasca y su acumulación sobre el suelo y lo atribuyó a un problema de muestreo. Los datos de esa TABLA insinúan un desplazamiento de los picos que debería estudiarse con más cuidado antes de hacer interpretaciones sobre la dinámica de la hojarasca en el cafetal.

6.2. El arrastre por drenaje superficial:

En principio, para un punto medio de la ladera y del cafetal, el arrastre de hojarasca no debiera influir en el balance de la misma para ese punto, pues se presume que el movimiento a lo largo de la pendiente es más o menos uniforme (al menos a la escala de toda la ladera) y que las salidas por arrastre se igualan a las entradas por el mismo arrastre. Por eso no hemos considerado estos valores en la discusión anterior. Los datos sobre la magnitud movida por el drenaje superficial se

TABLA VI-12 : hojarasca arrastrada por drenaje superficial
 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ (27-07-88/24-08-89)

cafetal		café	otras especies	fracción**	total
	inicial	265,34	1413,05	406,9	2085,29
SOMBRA	caída	334,73	90,85		425,58
	arrastrada	38,18	21,88	12,82	72,88
	*	11,4	24,1		17,1
	inicial	247,58	1266,55	129,2	1643,28
SDL	caída	318,68	95,19		413,87
	arrastrada	15,64	10,70	9,63	35,86
	*	4,9	11,2		8,7

* : % de la hojarasca caída

** :hojarasca fraccionada no diferenciable

deben relacionar más bien con el balance a nivel de las parcelas de erosión y con el proceso erosivo.

La TABLA VI-12 muestra los valores de hojarasca anual arrastrada y su porcentaje respecto a la caída, incluyendo el monto inicial en las parcelas de erosión. Aunque ya hemos dicho que el monto sobre el suelo varía a lo largo del año, el valor inicial sirve de referencia con respecto a la importancia del arrastre en cada cafetal. La hojarasca inicial en el cafetal de sombra fue mayor, además el punto anterior muestra que la tasa de descomposición es menor, de modo que no es de extrañar que el arrastre haya sido mayor, es decir que este hecho no puede atribuirse a una erosión más fuerte en este cafetal.

Si estos valores son un reflejo del comportamiento de la ladera (lo cubierto con cafetal), entonces las proporciones de pérdida son importantes al nivel del sistema, sobre todo al calcular el monto general de "pérdida" por descomposición.

Las Figuras VI-22 y VI-23 muestran la magnitud de los arrastres a lo largo del año. Se observa que el arrastre de la hojarasca del café no sigue la misma tendencia que el resto de la hojarasca: el arrastre de la hojarasca de café se ajusta mejor a la caída de ese mismo material, mientras que el resto es removido en forma similar a la fracción mineral del suelo (ver capítulo 9). Es decir, que la hojarasca de café es arrastrada a medida que va cayendo, pero no así el resto del material. En el caso del cafetal de sol podemos pensar en una explicación: el grueso del material es trozos de ramas y su mayor peso por unidad puede

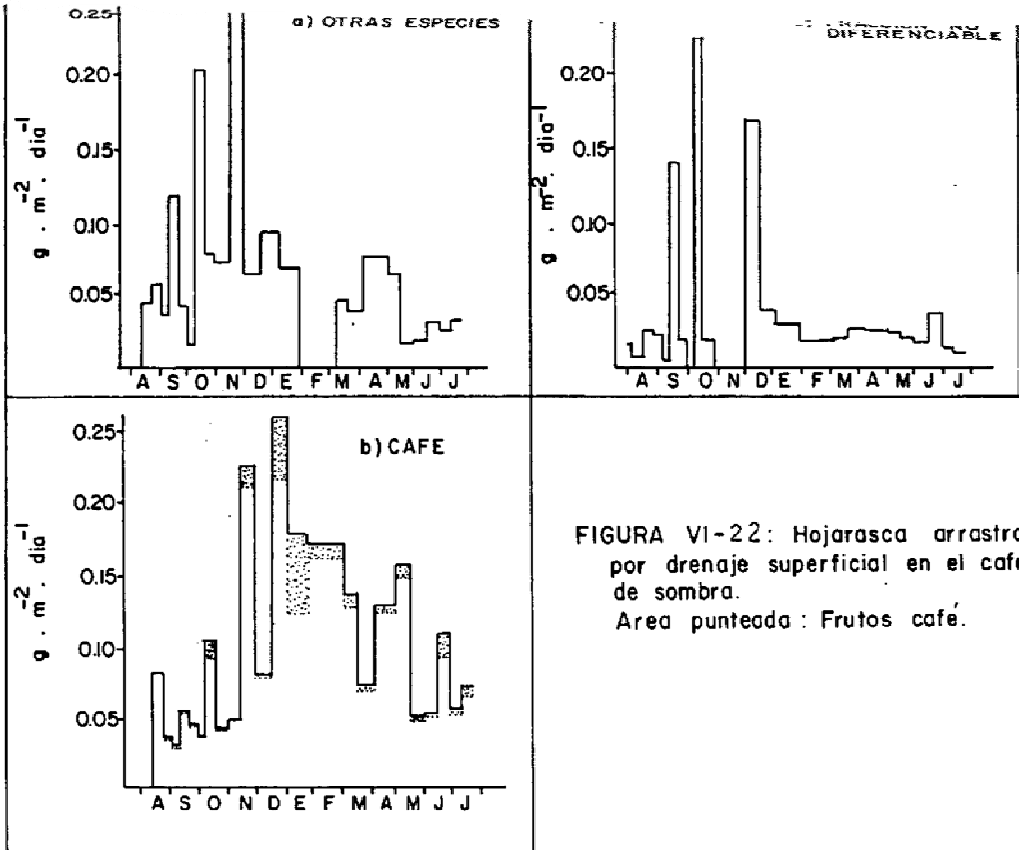


FIGURA VI-22: Hojarasca arrastrada por drenaje superficial en el cafetal de sombra.
 Area punteada: Frutos café.

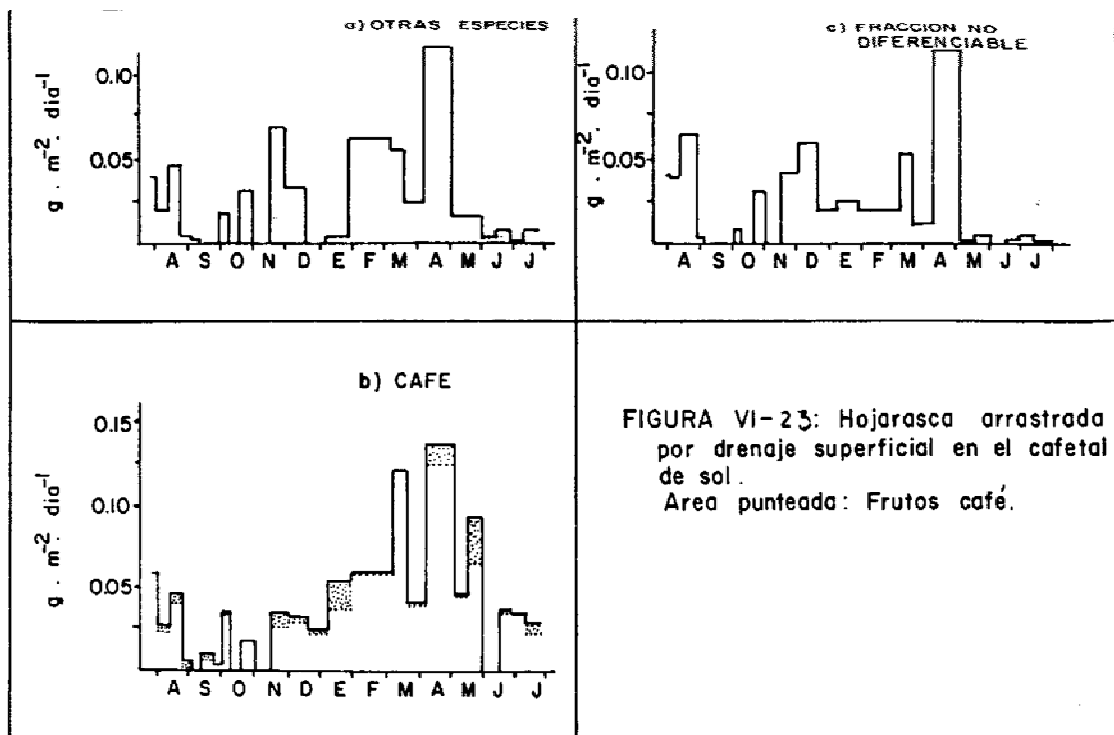
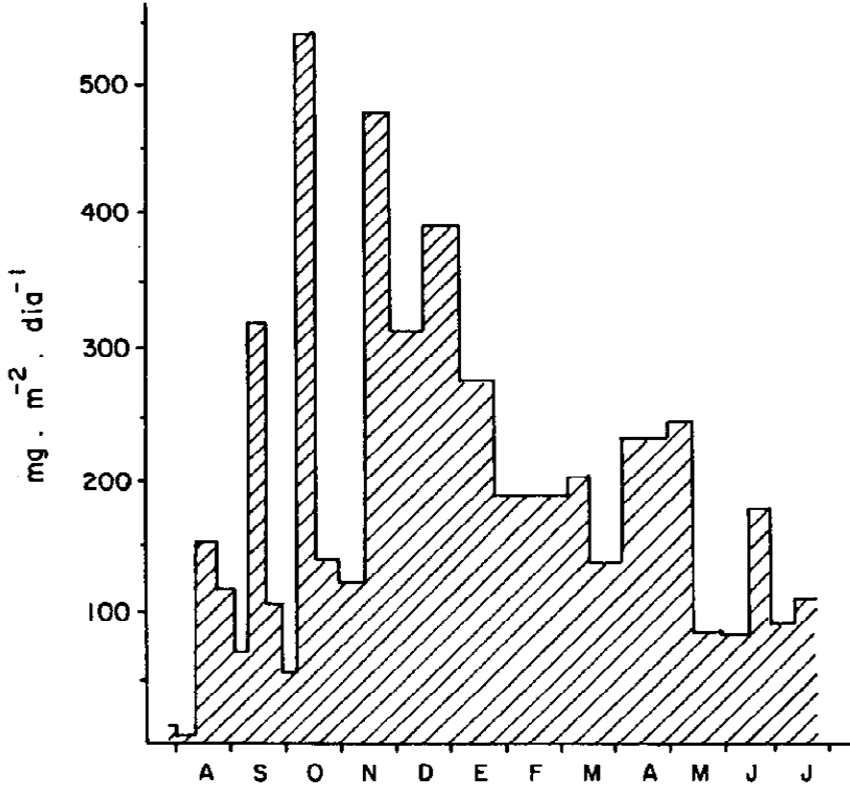


FIGURA VI-23: Hojarasca arrastrada por drenaje superficial en el cafetal de sol.

Area punteada: Frutos café.

a) CAFETAL SOMBRA



b) CAFETAL SOL

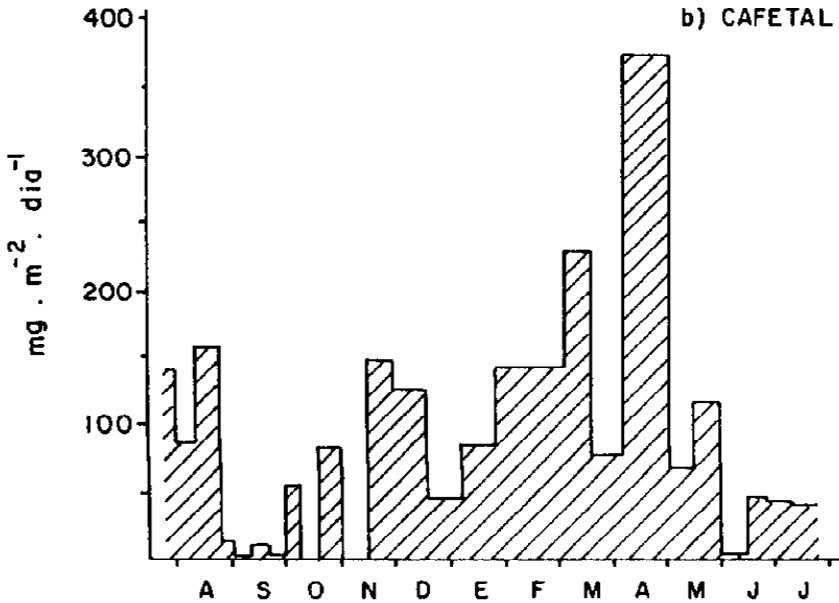


FIGURA VI-24 : Total de hojarasca arrastrada por drenaje superficial.

hacer que desde el punto de vista del arrastre se comporte más como piedra que como resto vegetal; en el caso del cafetal de sombra además de lo anterior (que también ocurre) buena parte del material son hojas de *Inga* y no entendemos ese comportamiento.

Esta forma de arrastre relacionada con el arrastre de la fracción mineral del suelo es la que domina el proceso de pérdida de la hojarasca, como se observa en la Figura VI-24 (ver capítulo 9).

7. VARIABILIDAD ESPACIAL

Los cafetales, al igual que la mayoría de los cultivos, presentan una regularidad importante en la distribución de ambientes: cuanto menor el número de especies involucradas menos variable es el número de microambientes. En un cafetal, los arbustos determinan tres grandes tipos de microambientes: el área justo debajo de los cafetos (entre el tronco y el borde de su copa), el área de borde de la copa y el área sin cobertura de café. En un cafetal sombreado con árboles, éstos introducen un nuevo elemento generador de microambientes, de los cuales hemos considerado como más importantes en nuestro caso los mismos tres mencionados para el café pero con o sin cobertura de árboles, es decir un total de seis microambientes cuyo efecto debe notarse tanto en los compartimientos aéreos como subterráneos.

En este capítulo hemos querido mostrar la importancia de esta separación ambiental, pues hasta ahora hemos discutido las variaciones temporales considerando el cafetal como un todo.

Comenzamos por hacer mapas de proyección de copas de cafetos en ambos cafetales y de árboles en el cafetal de sombra y cuantificar en cada uno la proporción ocupada por cada ambiente. Allí se reveló la importancia relativa de cada uno de ellos en cada cafetal y con esa información corregimos los datos de precipitación efectiva y caída de hojarasca de modo de aproximar los resultados lo más posible a la situación real. Como esta información sobre importancia relativa de microambientes ha sido utilizada en esa forma, creimos conveniente darla en la parte

introductoria del trabajo, de modo que el resultado de este análisis de proporciones se puede encontrar en el capítulo IV (páginas 96 a 103).

La corrección que hicimos con ese cálculo de proporciones cambió en parte la situación presentada con los datos de los dispositivos distribuidos al azar. Para ilustrar ese cambio mostramos los valores de algunos compartimientos del balance hídrico en las TABLAS VI-13 y VI-14.

Esos resultados nos muestran que el mayor cambio está en los valores de precipitación efectiva y por ende en intercepción, lo cual significa que la aleatoriedad de los pluviómetros subestimó los ambientes con cobertura. Naturalmente que esto es indicio que si se desea mantener la aleatoriedad en la distribución debe aumentarse el número de pluviómetros, pero creemos que sería mucho más eficiente solo realizar un "azar estratificado" (más económico, logísticamente más sencillo y resultados más cercanos a la realidad). Es evidente que cuando los microambientes son bien diferenciables, el muestrearlos por separado disminuye la variabilidad de los datos y en consecuencia se necesitan muchas menos unidades de muestreo (pluviómetros en este caso). Los cálculos de coeficientes de variación que mostraremos más adelante, nos orientan sobre en cuales microambientes debemos mejorar la información.

TABLA VI-13 : compartimientos del balance hídrico con y sin considerar importancia de microambientes: cafetal de SOMBRA, en mm y % de precipitación total

periodo		pp efectiva parcial	pp efectiva total	intercep.	drenaje superficial
lluvioso	ori.	1178,21	1211,77	255,86	80,34
		80,3%	82,6%	17,4%	5,5%
	cor.g.	1118,70	1153,22	313,78	
		76,2%	78,6%	21,4%	
	cor.e.	950,96	984,46	483,17	75,64
		64,8%	67,1%	32,9%	5,2%
seco	ori.	206,27	208,89	30,22	8,51
		86,3%	87,4%	12,6%	3,6
	cor.g.	196,37	199,41	39,70	
		82,1%	83,4%	16,6%	
	cor.e.	175,96	178,58	60,53	9,67
		73,6%	74,7%	25,3%	4,0%
total	ori.	1384,48	1420,66	286,08	88,85
		81,1%	83,2%	16,8%	5,2%
	cor.g.	1315,07	1352,63	354,11	
		77,1%	79,3%	20,7%	
	cor.e.	1126,92	1163,04	543,70	85,31
		66,0%	68,1%	31,9%	5,0%

ori. : según datos originales

cor.g. : según corrección para todo el cafetal

cor.e. : según corrección para parcela de erosión

TABLA VI-14 : compartimientos del balance hídrico con y sin considerar importancia de microambientes: cafetal de SDL, en mm y % de la precipitación total.

periodo		pp efectiva parcial	pp efectiva total	intercep.	drenaje superficial
lluvioso	ori.	1306,73	1322,58	145,05	91,51
		89,0%	90,1%	9,9%	6,2%
	cor.g.	1239,01	1254,86	212,77	86,80
		84,4%	85,5%	14,5%	5,9%
seco	ori.	230,44	232,29	6,82	9,61
		96,4%	97,1%	2,9%	4,0%
	cor.g.	230,25	232,10	7,01	12,20
		96,3%	97,1%	2,9%	5,1%
total	ori.	1537,17	1554,87	151,87	101,12
		90,1%	91,1%	8,9%	5,9%
	cor.g.	1469,26	1486,96	219,78	99,00
		86,1%	87,1%	12,9%	5,8%

ori. : según datos originales

cor.g. : según corrección para todo el cafetal

cor.e. : según corrección para parcela de erosión
en este cafetal cor.g.= cor.e.

7.1. Efecto de los microambientes en la precipitación efectiva parcial:

En el cafetal de sol, donde hemos definido tres microambientes, es en las zonas de borde de cafeto donde se recoge la mayor cantidad de agua, en segundo lugar en las zonas sin cobertura y por último debajo de los cafetos (TABLA VI-15).

período	microambientes		
	sin cobertura	borde cafeto	bajo cafeto
lluvioso	1338,26	1485,97	878,17
seco	224,91	282,58	203,48
TOTAL AÑO	1563,17	1768,55	1081,65

Las áreas de borde de cafeto no sólo reciben más agua que el resto sino que reciben más por unidad de superficie que la dada por la precipitación total, es decir, son áreas de concentración de agua. Nuestra interpretación es que se trata de un efecto de la arquitectura de la planta y la forma decumbente de las hojas que entre ambas dan una forma de paraguas donde cada hoja pasa lo que recoge a la siguiente y así se van sumando los excedentes de agua. Cabe destacar que esta variedad mantiene una forma simétrica en su ramazón y gran densidad de hojas, con respecto a la variedad de sombra.

Este mismo razonamiento nos permite entender los bajos valores de agua registrados debajo de la copa del cafeto.

Las zonas no cubiertas por cafetos se ven de todos modos afectadas por estos ya que reciben menos agua, por unidad de superficie, que la de precipitación total. Esto es lógico puesto que los cafetos no están tan alejados unos de otros y producen una "sombra de lluvia" sobre parte de las áreas descubiertas.

En el cafetal de sombra los resultados muestran las mismas tendencias (TABLA VI-16).

TABLA VI-16 : distribución de precipitación efectiva parcial en cafetal de SOMBRA, en l.m ⁻²						
período	microambientes					
	con árbol			sin árbol		
	a	b	c	a	b	c
lluvioso	1254,40	1261,43	979,35	1321,61	1358,56	1027,32
seco	144,48	227,88	154,56	240,42	258,34	179,34
TOTAL AÑO	1398,88	1489,31	1133,91	1562,03	1616,90	1206,66

a: sin cobertura cafeto
 b: borde cafeto
 c: bajo cafeto

Se nota que debajo de los cafetos la precipitación efectiva parcial es la menor, mientras que en el borde de los cafetos es la mayor; el razonamiento a seguir es el mismo que para el cafetal de sol, solo que en este caso la estructura del cafeto es más irregular en su ramazón y por lo tanto las diferencias entre los valores de borde de cafeto con respecto al resto no son tan acentuadas como en el caso de la variedad de sol.

Como es lógico esperar, todos los ambientes bajo árbol tienen valores menores que sus homólogos sin árbol: la diferencia

entre cada par nos da el extra de intercepción por parte de los árboles sombreantes. Con respecto a la precipitación total, esa diferencia es máxima para los espacios sin café (10%) y mínima para los espacios debajo de café (5%). Claro que hay que recordar que esos árboles no estaban en sus mejores condiciones en el lapso del trabajo por lo que esa diferencia puede considerarse como lo mínimo que pueden interferir esos árboles. La TABLA VI-17 muestra los valores reales de precipitación de acuerdo con el área que ocupa cada microambiente dentro del cafetal: esto nos permite calcular la importancia de los árboles sombreantes en la interferencia: 125,20 mm para el total anual, de los cuales 94,71 mm corresponden a la época lluviosa y 30,45 en la seca.

TABLA VI-17 : distribución proporcional de precipitación efectiva parcial en cafetal de SOMBRA, en mm

período	microambientes					
	con árbol			sin árbol		
	a	b	c	a	b	c
lluvioso	111,64	176,60 530,14	241,90	132,16	217,37 624,85	275,32
seco	12,86	31,90 82,94	38,18	24,04	41,33 113,43	48,06
TOTAL AÑO	124,50	208,50 613,08	280,08	156,20	258,70 738,28	323,38

a: sin cobertura cafeto
 b: borde cafeto
 c: bajo cafeto

Pareciera evidente que por crecimiento de las ramas, movimiento de sus puntas y de las hojas, los pluviómetros ubicados en el borde de cafetos deberían tener una mayor

variabilidad entre sí que el resto. Sin embargo esto no es así: si analizamos el coeficiente de variación para los pluviómetros de cada microambiente (ANEXO 4) vemos que los valores debajo de los cafetos son mucho más variables. La menor variabilidad se encuentra en todo momento en los pluviómetros sin cobertura.

Durante la época seca, la variabilidad en el borde de cafetos aumenta, probablemente por la caída de hojas y crecimiento de las nuevas (TABLA VI-18). Por el contrario, debajo de los cafetos la entrada de agua es menos variable en la época seca que en la lluviosa.

TABLA VI-18 : coeficiente de variación medio, pluviómetros cafetal de SOL			
período	microambientes		
	sin cobertura	borde cafeto	bajo cafeto
lluvioso	8,70	26,58	38,51
seco	8,13	34,81	28,72
TOTAL AÑO	8,54	29,08	35,53

TABLA VI-19 : coeficiente de variación medio, pluviómetros cafetal de SOMBRA					
período	sin cobertura	solo bajo café	solo borde café	Inga + bajo café	Inga + borde café
lluvioso	28,03	42,47	22,15	33,17	24,11
seco	12,82	45,29	37,22	38,26	28,85
TOTAL AÑO	23,40	43,33	26,74	34,72	25,55

7.2. Efecto de los microambientes en la caída de hojarasca:

En un año, un colector promedio directamente influenciado por un árbol de *Inga* que combine los tres ambientes posibles bajo él (sólo *Inga*, borde de cafeto y bajo cafeto) recoge 12,97 g de hojarasca ($150,8 \text{ g.m}^{-2}$) contra 3,26 g ($37,9 \text{ g.m}^{-2}$) recogida por la misma combinación pero sin *Inga*, es decir 4 veces más bajo *Inga* (datos de 09-05-88 a 02-05-89). Visto de otra manera, el 80% de la hojarasca caída que no es café, ha sido recogida por los colectores directamente influenciados por un árbol. Esto significa que la hojarasca cae bastante verticalmente ya que el colector más alejado de un árbol de *Inga* está a 9 m del borde de su copa, y la media es de 4,5 m.

Ahora bien, de ese 80% más de la mitad (56%) es recogida en las áreas que sólo están cubiertas por el árbol, lo cual significa que los cafetos interfieren con la caída de hojarasca de *Inga*, que es lo esperable. Pero sorpresivamente, lo recogido bajo el cafeto es el doble de lo recogido en el borde.

En las zonas no influenciadas directamente por *Inga* vemos que los colectores sin ninguna cobertura vegetal tienen el mínimo de recolección. Por el contrario, los influenciados por cafetos tienen una colecta mucho mayor de hojarasca distinta a café, tanto los de borde como los que están debajo de los arbustos.

TABLA VI-20 : hojarasca distinta a café en colector promedio (09-05-88/02-05-89) cafetal de SOMBRA						
unidades	con árbol			sin árbol		
	a	b	c	a	b	c
g	20,82	5,43	11,22	0,61	4,49	4,68
g.m ⁻²	242,1	63,1	130,5	7,1	52,2	54,4

a: cielo abierto
b: borde cafeto
c: bajo cafeto

En resumen, podemos decir que los mayores aportes de hojarasca distinta a café los recibe el área justo debajo de los árboles y los mínimos el área fuera de los árboles, pero los cafetos actúan como trampas de hojarasca acumulando en sus zonas de influencia cierta cantidad de ese material. en las zonas cubiertas con *Inga* esto no parece tener mucha importancia, pero fuera de ellas esto representa un aporte adicional de nutrientes para el café.

Por el contrario, para este mismo cafetal de sombra, la hojarasca de café donde más cae es en el borde de los cafetos (TABLA VI-21).

Se nota que para el periodo de estudio la hojarasca de café fue mucho más abundante que la de otras especies, básicamente *Inga* en el cafetal de sombra.

TABLA VI-21 : hojarasca de café en un colector promedio caída en el lapso 09-05-88 al 02-05-89 cafetal de SOMBRA			
	sin cobertura	borde cafeto	bajo cafeto
g	16,17	29,63	24,73
g.m ⁻²	188,0	344,5	287,6

Reuniendo estos resultados tenemos lo siguiente: en términos generales, las zonas directamente influenciadas por Inga reciben una cantidad muy importante de hojarasca sin grandes diferencias entre los subambientes en cuanto a su monto pero seguramente sí en cuanto a su capacidad de suministrar nutrientes dada sus diferencias en calidad (TABLA VI-22). Sólo el análisis químico de este material dará la importancia verdadera de cada aporte en cuanto a su potencialidad en el suministro de nutrientes.

TABLA VI-22 : hojarasca total en colector promedio (09-05-88/02-05-89) cafetal de SOMBRA						
	con árbol			sin árbol		
	a	b	c	a	b	c
g.m ⁻²	430,1	407,6	418,1	195,1	396,7	342,0
café	43,7%	84,5%	68,8%	96,4%	86,8%	84,1%
otros	56,3%	15,5%	31,2%	3,6%	13,2%	15,9%

a: cielo abierto
b: borde cafeto
c: bajo cafeto

En el cafetal de sol la distribución es algo distinta:

TABLA VI-23 : hojarasca en un colector promedio (09-05-88/02-05-89) en g.m ⁻² cafetal de SOL			
	sin cobertura	borde cafeto	bajo cafeto
CAFE	85,23	333,60	425,81
OTROS	119,53	115,82	49,42
TOTAL	204,76	449,42	475,23

Aquí hay que hacer una observación importante: en este cafetal aún persisten los restos muertos de los árboles que antes lo ocupaban (troncos y parte de ramas) y una fracción importante de la hojarasca llamada OTROS proviene de este tipo de material. Está claro que en la medida que pasen los años, esta fracción será cada vez menor y eventualmente desaparecerá. De modo que los valores que mostramos de hojarasca total tienen una importancia relativa, y hay que hacer énfasis en la fracción CAFE que es la que en algún tiempo será la única existente.

8. NÚTRIENTES

El estudio de los nutrientes en los distintos compartimientos del balance hídrico es interesante de enfocar tanto por su papel en la estabilidad del sistema (su mantenimiento en el tiempo) como por notar como es afectado por dos formas distintas de un mismo cultivo.

Desde hace más de tres décadas la importancia del aporte de nutrientes por las precipitaciones ha ido haciéndose cada vez más evidente (Allen et al, 1968). Para algunos ecosistemas es la fuente más importante en nutrientes, pero aunque éste no sea el caso, siempre es un aporte apreciable. De la misma forma, la evaluación de las salidas de nutrientes de un sistema son de suma importancia. Según Jordan (1982), una de las formas de evaluar el papel del suelo como fuente de nutrientes para el sistema es calcular la diferencia entre las entradas por precipitación y las salidas por drenaje: cuando las salidas son mayores que las entradas es necesario un suministro de nutrientes por meteorización para mantener el sistema en equilibrio; cuando las salidas son menores o iguales a las entradas significa o que el sistema está en etapa sucesional o, en caso de estar en equilibrio, que la meteorización no juega ningún papel en el ciclaje de nutrientes. En sus estudios en San Carlos de Rio Negro llegó a esta última conclusión, que según él significan que el sistema puede mantenerse con los aportes por precipitación.

En este trabajo presentamos los primeros resultados sobre

contenido de cuatro cationes en aguas de precipitación total, precipitación efectiva parcial (pluviolavado), escurrimiento de tronco y drenaje superficial para cada cafetal. Las Figuras VI-25, VI-26, VI-27 y VI-28 muestran, respectivamente, los aportes de potasio, sodio, calcio y magnesio por aguas de lluvia, precipitación efectiva parcial y las pérdidas por drenaje superficial. La TABLA VI-25 muestra entradas y salidas de los mismos cationes para otros ecosistemas del mundo.

8.1. Las entradas por precipitación

Si comparamos el aporte en los cuatro cationes estudiados a lo largo del año notamos una secuencia general similar en el sentido que durante la época lluviosa los montos son mayores que durante la época seca. Pero esos montos difieren enormemente entre un elemento y otro (TABLA VI-24); para el lapso julio 88 - julio 89 las precipitaciones aportaron 25.3 Kg.ha⁻¹ de Na, 21.6 de Ca, 8,1 de K y 5.6 de Mg.

El aporte de sodio es muy variable de un año a otro (Figura VI-25), de hecho es el más variable de los cationes medidos. Esto no es nuevo (Likens et al, 1977; Johnson & Swank, 1980), en un análisis de 4 años (Allen et al, 1968) encontraron que sodio y calcio fueron los elementos más fluctuantes (14,0-51,0 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ y 6,5-24,0 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ respectivamente).

Jordan (1982) no midió Na pero los valores de Ca en aguas de lluvia en San Carlos de Rio Negro (Venezuela) entre 1976 y 1979

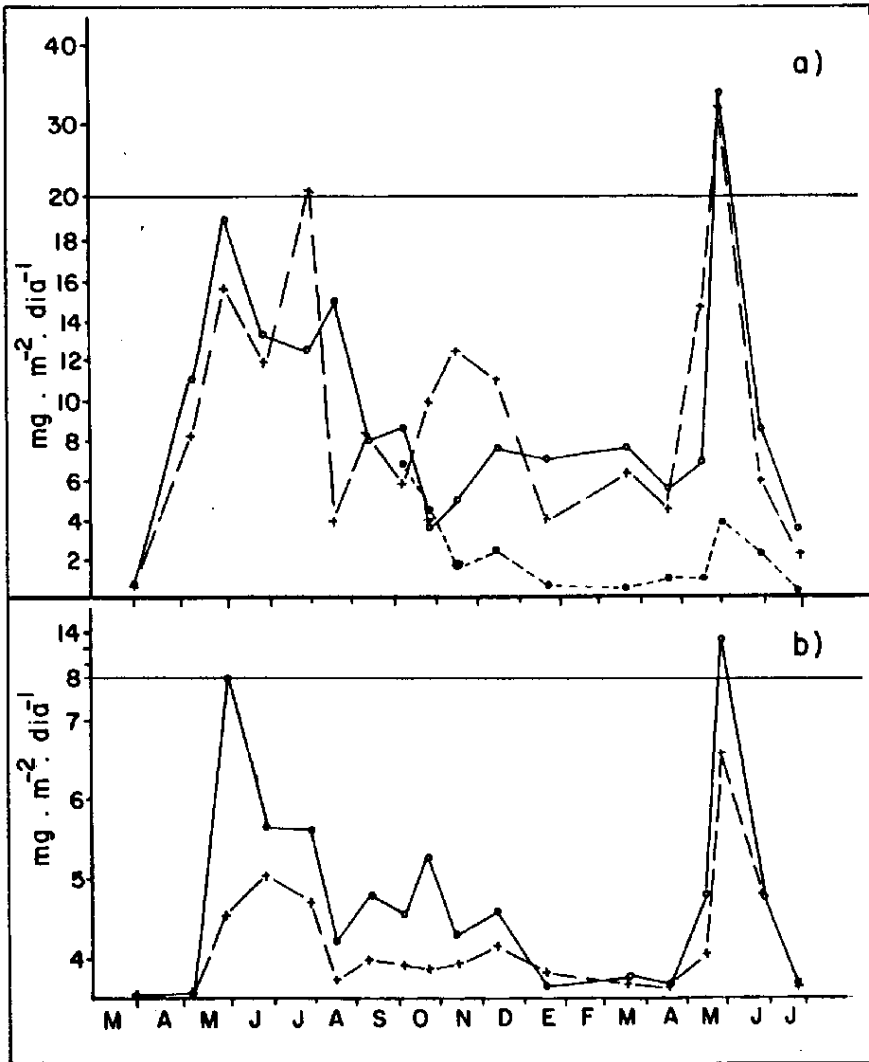


FIGURA VI-25: Polígono de frecuencias con entradas y salidas de potasio,
 a) precipitación total y efectiva,
 b) drenaje superficial,
 o café de sombra,
 + café de sol,
 ● precipitación total.

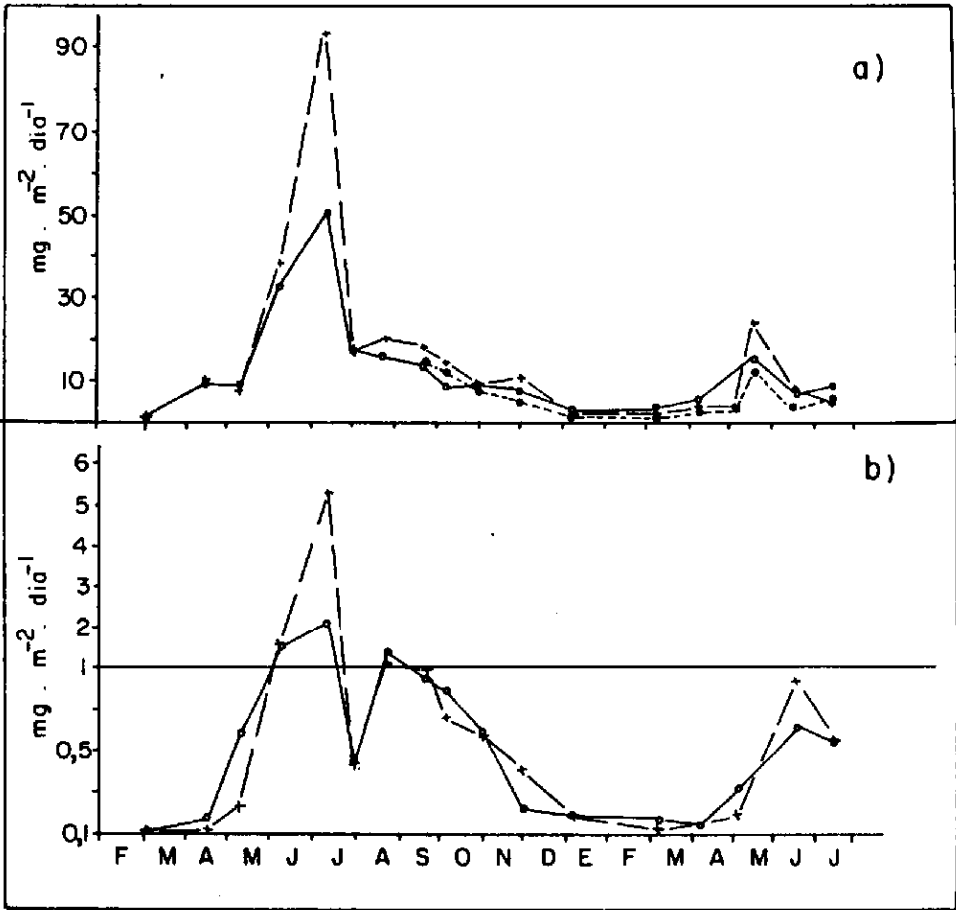


FIGURA VI-26: Polígono de frecuencia con entradas y salidas de calcio.

a) precipitación total y efectiva.

b) drenaje superficial.

○ : cafetal de sombra.

+ : cafetal de sol.

● : precipitación total.

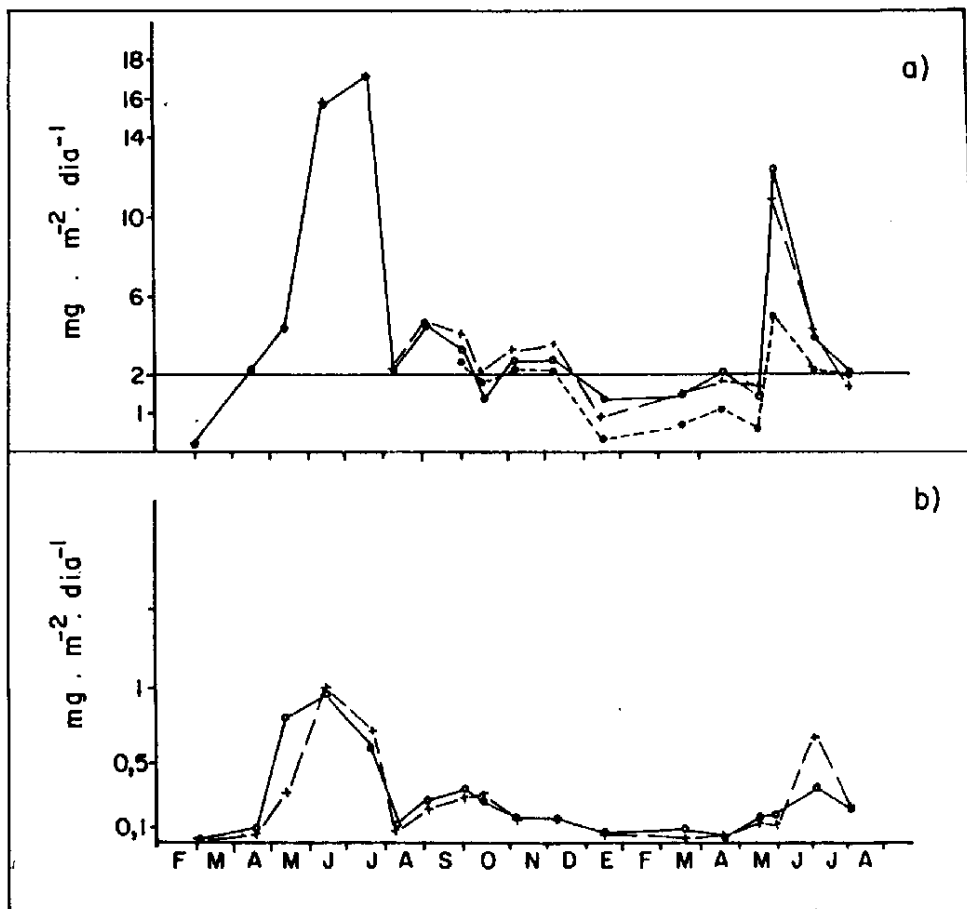


FIGURA VI-27: Polígono de frecuencias con entradas y salidas de magnesio, ,
 a) precipitación total y efectiva,
 b) drenaje superficial.
 ○ : cafetal de sombra.
 + : cafetal de sol.
 • : precipitación total.

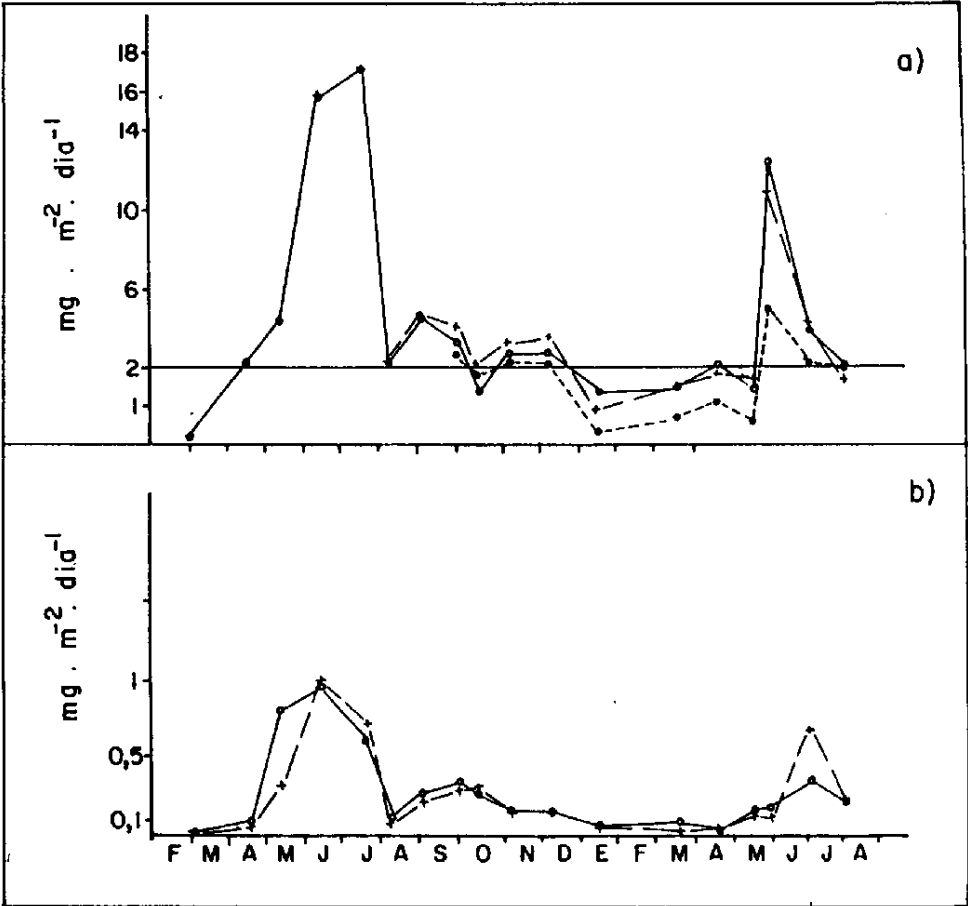


FIGURA VI-27: Polígono de frecuencias con entradas y salidas de magnesio,
 a) precipitación total y efectiva,
 b) drenaje superficial.
 ○ : cafetal de sombra.
 + : cafetal de sol.
 ● : precipitación total.

van de 6,90 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ en 1978 a 14,20 en 1976, siendo que la precipitación no fue muy distinta en ambos años (3392 y 3869 mm respectivamente) esa variación en el aporte solo puede relacionarse con otros factores atmosféricos. En ese estudio, el Mg presentó mayor variabilidad con 1,69 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ en 1977 y 6,47 en 1978, años en los que la diferencia en precipitación fue de 10% y además años distintos a los extremos para Ca.

Las variaciones intra e interanuales en el aporte de nutrientes por precipitación son notables. Los trabajos de Lewis (1981) y Prospero et al. (1981) ilustran sobre las fuentes naturales y a veces no muy cercanas de aerosoles que alteran fuertemente los contenidos de cationes y fósforo, como quemas de vegetación a pocos Km hasta polvo sahariano que atraviesa el Atlántico.

En nuestro caso no podemos discutir el origen de las variaciones, sólo mencionaremos dos cosas: una que la relación Na/K es de 3,12 lo cual es un comportamiento netamente continental, al igual que en Mantecal donde es 5,1 (Lopez-Hernandez et al, 1986) (cuando Na/K = 27,8 es indicativo de influencia marina (Allen et al, 1968; Carlisle et al, 1966)), y la otra que en ninguna parte de la cuenca del río Canaguá hay alguna industria ni centro urbano que pudiera servir de fuente contaminante, sólo quemas de vegetación esporádicas y poco extendidas.

Allen et al (1968), trabajando en Inglaterra, mostraron una alta correlación entre la cantidad de nutrientes y el monto de la

precipitaciones, especialmente en el caso de los cationes. Nada de esto es la norma en nuestro caso. Es cierto que en líneas generales durante la época lluviosa el aporte de cationes es mucho mayor que durante la seca, pero las variaciones en el contenido de nutrientes a lo largo del año no siguen el ritmo de las precipitaciones.

La secuencia seguida por sodio, magnesio y calcio permite separar la época lluviosa en dos partes: 1) los primeros tres meses (junio, julio, agosto) y 2) el resto (septiembre a noviembre). La primera parte presenta valores mucho más altos de todos los cationes. En el caso de potasio esta relación es probable pero no es clara.

Con respecto a esta relación, aumento del contenido de nutrientes a inicios de la época lluviosa, Lopez-Hernandez et al (1983; 1986 a,b) han hecho la misma observación analizando agua de lluvia en Mantecal, Llanos de Venezuela, precisamente una zona influenciada por los mismos vientos que afectan la cuenca del río Canaguá en la que estamos trabajando. En Mantecal, para Na, Ca y Mg la mayor contribución anual se concentra en junio y julio correspondiendo a un 52%, 55% y 44% del total anual, respectivamente (año 1980). En este caso el K presentó dos máximos uno al inicio y otro al final de la época lluviosa.

Los datos de Jordan (1982) para San Carlos de Rio Negro, donde los vientos determinantes tienen distinto origen, muestran un pico de Ca en marzo-abril, pero para K y Mg la periodicidad no es clara.

8.2. El pluviolavado

Los cambios en el contenido de nutrientes del agua por su paso a través de la vegetación pueden ser muy importantes (Chapin, 1980). Tukey (1970) mostró como el lavado foliar del potasio puede exceder 7 veces el acumulado en la producción anual, siendo en general el orden de lavado $K > N > P$. Nuestros resultados muestran que el potasio es el elemento que se ha lavado más fácilmente de hojas y tallos, llegando al suelo un valor 3,5 veces superior al que entró por lluvia. En ambos cafetales el lavado es mayor durante los primeros meses de la época lluviosa cuando hay un máximo de follaje maduro pero joven. De todas formas el aporte por el lavado foliar es ligeramente mayor en el cafetal de sol, debido básicamente a que la precipitación efectiva también es mayor. Las diferencias en aportes entre épocas seca y lluviosa no son tan marcadas como en caso de los otros elementos, pero esto es porque la concentración de lavado es mucho más grande en la época seca y llega al suelo 7 veces más de lo que entró por lluvia: corresponde al momento de mayores cambios fenológicos pero no podemos saber si el incremento es por el cambio de follaje o por la floración, o ambos. La época lluviosa en forma global contribuye con mayores aportes pero más de un tercio de ellos provienen directamente de las lluvias.

El K es un elemento clave en los cultivos de café. Los

arbustos tienen altas exigencias de potasio durante el desarrollo de los frutos siendo el macronutriente que se encuentra en mayor proporción en ellos (capítulo I-2). Parece estar demostrado que durante su maduración los frutos obtienen las grandes cantidades de potasio requerido por traslado desde las hojas más próximas. Menao (1982) señala también que el contenido de potasio aumenta en las hojas durante el periodo lluvioso, lo cual tiene sentido si son ellas las que sirven de fuente del elemento para los frutos quienes lo requerirán en mayor cantidad a finales de la época lluviosa. Esto significa que deberíamos esperar un bajo contenido de potasio en el follaje senescente de comienzos a mediados de la época seca, lo cual es normal para macronutrientes móviles (Abrahamson & Caswell, 1982; Chapin, 1980)

El sodio muestra una variación anual muy similar en ambos cafetales, salvo en el caso de diciembre y enero pasados donde el pluviolavado en el cafetal de sombra presenta un pico bastante inexplicable. No solamente se asemejan los dos cafetales sino que siguen las mismas tendencias que la precipitación total (a excepción del caso mencionado). Esto responde sin duda a la relativa inamovilidad del sodio, por lo cual no incrementa la concentración en el agua al pasar por el follaje. Por el contrario, durante la época lluviosa disminuye en una proporción menor que la explicable por la diferencia en cantidad de agua: es decir pareciera que parte del material quedara retenido por el follaje.

El calcio es otro de los elementos citado como difícil de lavar. Nuestros datos muestran este comportamiento (salvo un

punto en junio de 1988). Pero se nota una tendencia en la curva del cafetal de sol de ser levemente mayor. Esto es efecto del incremento en el aporte durante la época lluviosa, el cual es mayor incluso considerando que el monto de agua en la precipitación efectiva parcial es mayor. Pero en la época seca, en el cafetal de sombra son mayores tanto el aporte como las concentraciones del elemento.

Desde el punto de vista del cultivo, éste no parece ser muy exigente con respecto al calcio.

El contenido de magnesio aumenta en la precipitación efectiva parcial con respecto a la precipitación total, indicando cierta movilidad. La variación anual es asombrosamente similar en el pluviolavado de ambos cafetales, lo que significa que entre los árboles sombreantes y la variedad *arabica* se lava la misma cantidad que con la variedad *bourbon* sola y de menor cobertura. De todas formas, dado que la precipitación efectiva parcial es mayor en el cafetal de sol que en el de sombra, este último presenta concentraciones superiores del elemento en la época seca.

El Mg es conocido como elemento importante para los cafetos los cuales tienen demandas especialmente altas en el desarrollo final de los frutos (capítulo I-2). Al contrario que en el caso del potasio, Henao (1982) señala que la proporción de Mg en las hojas aumenta a medida que estas se hacen senescentes, de modo que así deberíamos encontrarlo en la hojarasca de comienzos a mediados de la época seca. Esto está de acuerdo con la idea

general de que el Mg tiene poca movilidad una vez que es almacenado en las células vegetales.

La práctica agrícola de abonar con NPK en la etapa final de la maduración de los frutos responde a esas observaciones, pero se entiende que su eficacia está más ligada a la formación de nuevas hojas que a la utilización inmediata de los nutrientes por los frutos ya que se trata de elementos que son translocados de a hojas viejas a los frutos y estos son extraídos del sistema.

En general los resultados muestran que los aportes de potasio, magnesio y sodio por pluviolavado son mayores en el cafetal de sol, y que además eso es consecuencia del lavado en la época lluviosa, de donde se deduce que el follaje maduro del café de sol es más susceptible de ser lavado. Por otra parte, el sodio muestra una retención por parte del follaje que es mayor en los cafetos de sol.

Hemos incluido en el análisis el aporte en cationes del agua de escurrimiento de troncos (Figura VI-29). En términos de $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ese aporte es pequeño, pero teniendo en cuenta que no llega a cualquier sitio del suelo sino justo al pie de los arbustos su significado en la dinámica de nutrientes es mucho más importante que el de los otros compartimientos del balance hídrico. En general, el agua de escurrimiento de troncos presenta las mayores concentraciones de todos los cationes durante todo el año, siendo especialmente altas en la época seca.

Las concentraciones de Ca, Na y Mg son menores en todo

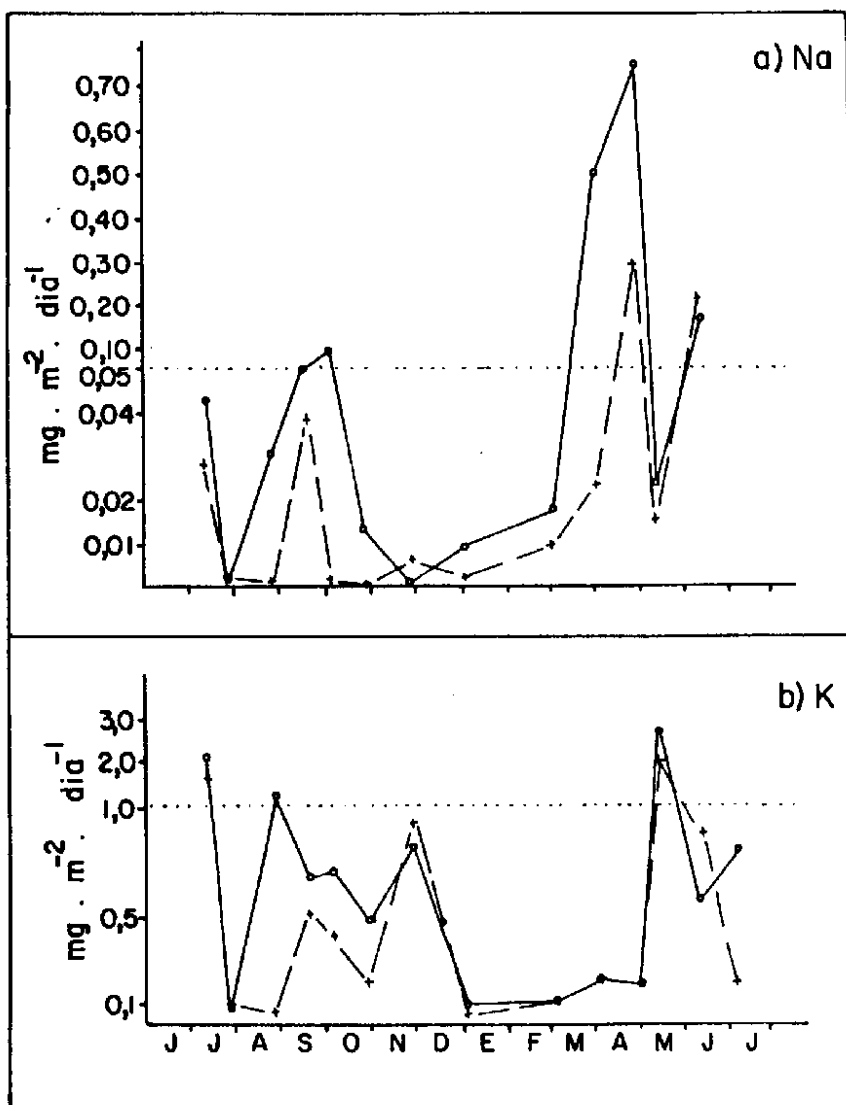


FIGURA VI-29: Polígono de frecuencia para escurrimiento por los troncos del café del catión
 a) sodio, b) potasio,
 o: cafetal de sombra,
 +: cafetal de sol.

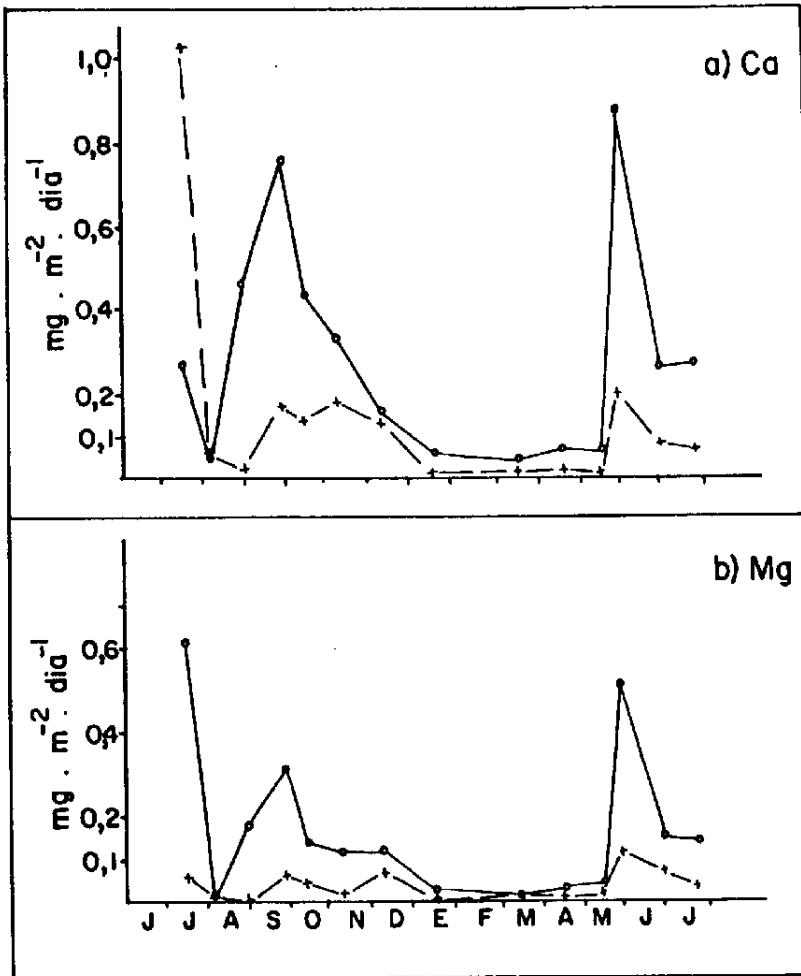


FIGURA VI-29^{''}: Polígono de frecuencia para escu-
 rrimiento por los troncos del café
 del catión
 a) calcio, b) magnesio,
 o cafetal de sombra
 + cafetal de sol

momento en los cafetos de sol. Por el contrario, las concentraciones de K son generalmente mayores en esos cafetos. Sin embargo, la mayor cantidad de agua de escurrimiento en los troncos de cafetos de sombra lleva a que ellos tengan mayores puntos de todos los elementos. El ritmo de los aportes a lo largo del año coincide perfectamente con el de los aportes por precipitación efectiva parcial.

Las pérdidas de solutos por escorrentia

Las mismas Figuras VI-25, VI-26, VI-27 y VI-28, así como la TABLA VI-24, muestran los resultados del contenido de cationes del agua de drenaje superficial.

El ritmo de esa pérdida coincide muy justamente con el aporte por precipitación efectiva y no sigue las tendencias de la magnitud de ese drenaje (Figura VI-9). No se observa en esas salidas algún efecto especial como picos de descomposición, ni siquiera vemos, en el caso del K, el efecto del abono químico (PALMAVEN 12-12-17). Ese comportamiento sugiere que el paso del agua de drenaje superficial es tan rápido que no llega a disolver los elementos en la hojarasca ni la superficie del suelo; una demostración de que esto sería que las proporciones en cationes entre precipitación efectiva y escorrentia fueran las mismas que las proporciones de agua (Figuras VI-7, VI-8 y VI-9). En efecto, en la TABLA VI-24 se muestra que para Ca, Mg y Na las proporciones de pérdida son similares a las pérdidas de agua durante la época seca, y un poco mayores durante la época lluviosa (sobre todo Mg y Na). El potasio, en cambio, muestra

valores en el cafetal de sombra 4 veces mayores de lo esperado si no hubiera cambios en el contenido, y 2 veces en el cafetal de sol; esto puede reflejar la menor cantidad de hojarasca en este último, que es donde con mayor probabilidad es lavado tan rápidamente este elemento.

Otra conclusión de estos resultados es que la mayor proporción de los aportes de cationes se infiltra en el suelo, tanto si son aportes externos naturales como los que acabamos de tratar, como si son producto de abonos químicos, como si son consecuencia de descomposición de hojarasca. Los datos que estamos comenzando a tomar de agua de drenaje oblicuo y profundo nos informarán sobre los cambios en composición química del agua después del paso por los horizontes funcionales de estos