

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EL EFECTO DE DIFERENTES REGIMENES DE USO DE LA TIERRA
EN LAS CARACTERISTICAS DEL SUELO
EN UNA LADERA DE SAN ANTONIO DE ESCAZU, COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en Biología para
optar al grado de Magister Scientiae.

PHILLIP MONTOYA GREENHECK

Ciudad Universitaria "Rodrigo Facio" Costa Rica
1987

DEDICATORIA

A mis padres

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Luis A. Fournier, Consejero Frincipal, por la magnífica orientación dada al presente trabajo de tesis y por su invaluable ayuda como Consejero y amigo durante la realización de los estudios.

Al Dr. José F. DiStefano y al M.S. Edgar Cutierrez E., miembros del comite consejero, por sus acertadas sugerencias, así como también al Dr. Walter A. Marín y a la M.S. María I. Morales por su ayuda y apoyo.

A todas las demás personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Biología como requisito parcial para optar al grado de Magister Scientiae.


Dr. Luis A. Fournier

Profesor Consejero


Dr. José Fco. DiStefano

Miembro del Comité Asesor

EDGAR E. GUTIERREZ E.
M.S. Edgar Gutierrez E.

Miembro del Comité Asesor

María Isabel Morales Z.
M.S. María I. Morales

Decano a.i. del S.E.F.

Walter A. Marín
Dr. Walter A. Marín

Director a.i. del Programa en Biología

Phillip Montoya G.
Phillip Montoya G.

Candidato

INDICE

Página

| | |
|--|------|
| RESUMEN | viii |
| Lista de cuadros | x |
| Lista de figuras | xi |
| Lista de abreviaturas | xiv |
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 2. REVISION DE LITERATURA | 4 |
| 2.1. Estado actual de los bosques tropicales | 4 |
| 2.2. Propiedades del suelo y su alteración | 6 |
| 2.2.1. Textura | 6 |
| 2.2.2. Densidad aparente | 7 |
| 2.2.3. Porosidad | 8 |
| 2.2.4. Retención de agua | 8 |
| 2.2.5. Conductividad hidráulica | 9 |
| 2.2.6. Macronutrientes | 9 |
| 2.2.7. Micronutrientes | 11 |
| 2.2.8. pH | 12 |
| 2.2.9. Materia orgánica | 12 |
| 2.3. Café, caña de azúcar y pastoreo en Costa Rica | 13 |
| 3. MATERIALES Y METODOS | 17 |
| 3.1. Descripción del sitio | 17 |
| 3.2. Diseño experimental | 18 |
| 3.3. Propiedades físicas | 21 |
| 3.3.1. Textura | 22 |
| 3.3.2. Densidad | 22 |
| 3.3.3. Porosidad | 22 |
| 3.3.4. Curva de retención de humedad | 22 |
| 3.3.5. Conductividad hidráulica | 23 |
| 3.4. Propiedades químicas | 23 |
| 3.4.1. Materia orgánica | 23 |
| 3.4.2. pH | 24 |
| 3.4.3. Aluminio intercambiable | 24 |

| | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 3.4.4. Macronutrientos | 24 |
| 3.4.5. Capacidad de intercambio catiónico efectiva | 25 |
| 3.4.6. Saturación de acidez | 25 |
| 3.4.7. Micronutrientos | 25 |
| 3.5. Propiedades biológicas | 25 |
| 3.5.1. Descomposición de materia orgánica | 25 |
| 3.5.2. Prueba biológica de fertilidad | 26 |
| 3.6. Análisis estadístico | 26 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSION | 27 |
| 4.1. Propiedades físicas | 27 |
| 4.1.1. Textura | 28 |
| 4.1.2. Densidad de partículas | 32 |
| 4.1.3. Densidad aparente | 34 |
| 4.1.4. Porosidad | 37 |
| 4.1.5. Capacidad de retención de agua | 39 |
| 4.1.6. Conductividad hidráulica | 44 |
| 4.1.7. Conclusiones | 48 |
| 4.2. Propiedades químicas | 51 |
| 4.2.1. Materia orgánica | 53 |
| 4.2.2. Acidez del suelo | 57 |
| 4.2.3. Nitrógeno | 61 |
| 4.2.4. Relación carbono:nitrógeno (C:N) | 63 |
| 4.2.5. Fósforo (P) y potasio (K) | 64 |
| 4.2.6. Calcio (Ca) y magnesio (Mg) | 66 |
| 4.2.7. Relaciones entre Ca, Mg y K | 68 |
| 4.2.8. Capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE) | 75 |
| 4.2.9. Saturación de acidez | 76 |
| 4.2.10. Manganeso (Mn), cinc (Zn), cobre (Cu), y hierro (Fe) | 79 |
| 4.2.11. Conclusiones | 82 |

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 4.3. Propiedades biológicas | 88 |
| 4.3.1. Descomposición de materia orgánica | 88 |
| 4.3.2. Prueba de fertilidad de invernadero | 89 |
| 5. CONCLUSIONES | 95 |
| 6. LITERATURA CITADA | 98 |
| APENDICE | 106 |

RESUMEN

En este trabajo se estudió el efecto de diferentes regímenes de uso de la tierra (café, caña de azúcar, pastos y bosque) sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, en una ladera con pendiente de aproximadamente 40%, a 1500 msnm, en San Antonio de Escazú, Costa Rica.

Las propiedades físicas estudiadas fueron las siguientes: la textura, la densidad, la porosidad, la retención de agua, y la conductividad hidráulica. Con respecto a las propiedades químicas se analizó la materia orgánica, la acidez del suelo, los macronutrientes, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), y los micronutrientes. Por otra parte, se estudió también la tasa de descomposición de la materia orgánica, y el crecimiento de plántulas de maíz en macetas de los diferentes suelos. Las propiedades físicas y químicas se midieron a 5cm y 25cm, y durante la estación lluviosa y la estación seca.

Todos los suelos presentaron texturas en el ámbito franco. En el bosque, la densidad de partículas y la densidad aparente fueron menores que en los demás suelos. El valor más alto de densidad aparente se registró en el potrero. El bosque presentó los valores más altos de porosidad, retención de agua, y conductividad hidráulica.

El potrero tuvo los valores más bajos de porosidad y conductividad hidráulica.

En cuanto a las propiedades químicas, el suelo forestal fue menos ácido y tuvo el nivel más bajo de Al intercambiable. Los suelos cultivados con café y caña de azúcar presentaron los niveles más altos de acidez. El suelo forestal presentó la mayor cantidad de materia orgánica. En este suelo también se registró el nivel más alto de N, a pesar de la aplicación de fertilizantes NPK en el cafetal y el cañal. En cambio, el nivel más bajo de P se registró en el bosque. El cafetal y el cañal presentaron los valores más altos de K, y el potrero el nivel más bajo. Por otra parte, los valores más altos de Ca y Mg, al igual que de la CICE, se registraron en los suelos de potrero y bosque. Sin embargo, solo el potrero presentó desbalances entre K, Ca y Mg. Los micronutrientes Mn, Zn, Cu y Fe fueron más altos en los suelos cultivados de café y de caña, especialmente en cuanto a Cu y Fe, posiblemente debido a la aplicación prolongada de plaguicidas.

La medición de la tasa de descomposición de la materia orgánica presentó deficiencias metodológicas que obviaron la distinción de diferencias entre los suelos.

El maíz presentó un mayor y mejor crecimiento en el suelo de bosque que en los demás suelos.

LISTA DE CUADROS

| | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| Cuadro 1. Propiedades físicas a dos profundidades en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pastos | 27 |
| Cuadro 2. Textura a dos profundidades en suelos de Pico Blanco de Escazú, bajo coberturas de bosque, café, caña, y pastos | 31 |
| Cuadro 3. Diferencias significativas de las propiedades físicas del suelo entre terrenos de Pico Blanco de Escazú, bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 49 |
| Cuadro 4. Propiedades químicas a dos profundidades en suelos de Pico Blanco de Escazú, bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 51 |
| Cuadro 5. Diferencias significativas en las propiedades químicas, entre suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos, en Pico Blanco de Escazú | 87 |
| Cuadro 6. Crecimiento de maíz en suelos provenientes de un bosque, un cafetal, un cañal, y un potrero | 92 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura No. | | <u>Página</u> |
|------------|---|---------------|
| 1. | Esquema de las parcelas de café, caña de azúcar, pastos y bosque; su división en lotes, cuadrículas y franjas | 20 |
| 2. | Arcilla a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pasto | 29 |
| 3. | Densidad de partículas a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pasto | 33 |
| 4. | Densidad aparente a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 35 |
| 5. | Porcentaje de poros a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 38 |
| 6. | Retención de agua a capacidad de campo, a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 40 |
| 7. | Retención de agua al punto de marchitez permanente, a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 41 |
| 8. | Precipitación y la variación en la retención de agua a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente | 43 |
| 9. | Retención de agua útil a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 45 |
| 10. | Conductividad hidráulica a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 47 |
| 11. | Materia orgánica a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 54 |

| Figura No. | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 12. Corelación de la materia orgánica y las propiedades físicas de los suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 56 |
| 13. pH a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 58 |
| 14. Aluminio intercambiable a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 60 |
| 15. Nitrógeno total a dos profundidades, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 62 |
| 16. Fósforo disponible a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 65 |
| 17. Potasio a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 67 |
| 18. Calcio a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 69 |
| 19. Magnesio a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 70 |
| 20. Relación calcio/potasio a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 72 |
| 21. Relación calcio/magnesio a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 73 |
| 22. Relación magnesio/potasio a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 74 |
| 23. Capacidad de intercambio catiónico efectiva a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña, y pastos . | 77 |

| Figura No. | <u>lágina</u> |
|---|---------------|
| 24. Saturación de acidez a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 78 |
| 25. Manganeso a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 80 |
| 26. Cinc (Zn) a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 81 |
| 27. Cobre (Cu) a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 83 |
| 28. Hierro (Fe) a dos profundidades, en tres épocas, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 84 |
| 29. Curva promedio de la descomposición de la materia orgánica en los suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos | 90 |
| 30. Crecimiento y peso seco final de maíz en suelos de bosque, de cafetal, de cañal y de potrero ... | 91 |
| 31. Relación de peso/altura (vigor), y de peso de vástago/peso de raíz de maíz en suelos de bosque, cafetal, cañal, y de potrero | 94 |

LISTA DE ABREVIATURAS

aguaCC: retención de agua a capacidad de campo
aguaPMP: retención de agua al punto de marchitez permanente
Al: aluminio
ANDEVA: Análisis de variacia
BQ: suelo bajo cobertura de bosque
Ca: calcio
CC: capacidad de campo
CF: suelo bajo cobertura de café
CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva
C.M.: cuadrado medio
CN: suelo bajo cobertura de caña de azúcar
CondH: conductividad hidráulica
Cu: cobre
Da: densidad aparente
Dp: densidad de partículas
F: textura franca
Fa: textura franca-arenosa
FA: textura franca-arcillosa
Fe: hierro
Fig.: figura
g.l.: grados de libertad
K: potasio
Mg: magnesio
Mn: manganeso
MO: materia orgánica
N: nitrógeno
P: fósforo
PMP: punto de marchitez permanente
PS: suelo bajo cobertura de pastos
S.C.: suma de cuadrados
Zn: cinc

1. INTRODUCCION

La conversión de bosques tropicales a usos agropecuarios y urbanísticos está ocurriendo a una velocidad acelerada. Para finales del siglo habrá 1.500 millones más de personas en el mundo y el 90% del incremento poblacional mundial corresponde a los países tropicales. Esta presión demográfica exigirá aún más la conversión de bosques para la producción de alimentos por lo que se hace imperativo llegar a conocer el comportamiento de estos ecosistemas y las reacciones ecológicas a su conversión agrícola. Esto permitirá que se pueda lograr un mejor provecho de la tierra, con una producción de rendimiento sostenido, en vez de continuar con manejos de corto alcance que inevitablemente degradan el sitio (JANZEN, 1973).

En años recientes Costa Rica ha alcanzado un nivel relativamente elevado de crecimiento en el sector agropecuario. Este crecimiento ha sido concentrado en unos pocos productos tradicionales como el ganado, el café, el banano, el arroz y la caña de azúcar. La expansión desmesurada con una tasa anual de 5,3% del sector pecuario se ha producido principalmente a costa de terrenos boscosos (BID, 1977). Las áreas destinadas al pastoreo han aumentado del 12,4% del territorio nacional en 1950 a aproximadamente 43% en 1985, y entre 300-500 km² de bosque se convierten anualmente a usos agrícolas (PARSONS, 1976; FOURNIER, 1985). Costa Rica es un país de vocación forestal y según FOURNIER (1981) en 1900 el 90% del territorio estaba

bajo bosques. Es importante anotar que cuando los bosques son convertidos a otros usos, las áreas más susceptibles de degradación son las laderas (BOURNEMIZA, 1976), ya que en Costa Rica las laderas ocupan un 70% de la superficie total (POSNER y MCPHERSON, 1981).

Unos de los principales problemas con que se enfrentan las autoridades públicas es el de cómo definir directrices para el uso apropiado de los recursos naturales. Se considera de urgencia contar con políticas de uso de la tierra que promuevan las prácticas de conservación de suelos, especialmente en el uso de tierra en zonas forestales (BID, 1977). Solo con un conocimiento exhaustivo de las interacciones físico-químico-biológicas de sistemas vegetación-suelo, se podrá llegar a políticas racionales en el uso de la tierra. Es necesario, entonces, estudiar en primera instancia la influencia de diferentes especies vegetales sobre las propiedades del suelo, especialmente aquellas responsables de la sustitución de bosques, como los pastos, el café y la caña de azúcar (NRC, 1980).

El objetivo de este trabajo es determinar los efectos principales que han tenido algunos usos tradicionales del suelo como lo son el cultivo del café, la caña de azúcar, y los pastos, sobre el suelo en laderas de vocación forestal. Especialmente se tratará de caracterizar los efectos de los diferentes regímenes de uso, en cuanto a factores físicos y químicos del suelo. El propósito de tal caracterización es poder ofrecer una base cuantitativa en la cual se puedan

fundamentar decisiones para el uso adecuado de la tierra con un rendimiento sostenido.

2. REVISION DE LITERATURA

En los próximos 15 años, en los trópicos ocurrirá el 90% del incremento demográfico mundial, unos 1.500 millones más de personas al llegar el año 2000 (PRB, 1979). Es inevitable que la ya acentuada destrucción de ecosistemas naturales para diversas necesidades humanas se vea fuertemente exacerbada de aquí en adelante.

2.1. Estado actual de los bosques tropicales

Por la escasez crítica a nivel mundial de alimentos y energía, los bosques están desapareciendo no solo debido a la clase campesina que los tala para establecer su agricultura de subsistencia (ARNOLD y JONGAMA, 1978), sino principalmente por la utilización de grandes extensiones para la ganadería y por compañías transnacionales (MYERS, 1976).

Además, la expansión urbana, que al estar ya ocupadas las tierras predilectas, llega a las periferias menos accesibles (FOURNIER, 1976), y se invaden terrenos boscosos.

Los bosques no solo proveen productos como la madera, la leña y el carbón, sino que nos brindan servicios, aunque intangibles, de valor trascendental. Los bosques juegan un papel muy importante en la protección contra condiciones climáticas extremas, al mantener niveles adecuados de precipitación y temperatura, y mejorar la calidad del aire (LETTEAU et al, 1979). VILLANOVA et al, (1976) calcularon que la mitad de la precipitación de la región

amazónica es generada por el bosque. En sitios donde los bosques han sido talados extensamente, a menudo se encuentran problemas de sequía (FRIEDMAN, 1977). Los bosques también protegen contra el extremo opuesto, al interceptar la precipitación de fuertes lluvias, disminuir el peligro de inundaciones y erosión. Los bosques de esta manera son indispensables para la protección de cuencas hidrográficas ya que mantienen el balance del ciclo hidrológico y evitan la sedimentación de embalses (BUDOWSKI, 1976; HARTSHORN et al, 1982).

Otro gran valor de los bosques, y en especial de los bosques tropicales, es su condición de banco genético y laboratorio viviente. Se han encontrado alcaloides en los bosques tropicales que se utilizan en el tratamiento de leucemia, y otros que parecen prometedores en el tratamiento de varias formas de cáncer, y de otras enfermedades (MYERS, 1976). También de importancia es la contribución de este banco genético natural al progreso de la agricultura moderna (WITTER, 1975). El bosque tropical por su complejidad, es además el mejor laboratorio para el estudio de la evolución (ASHTON, 1977), lo cual puede revelar muchas de las claves del comportamiento de plantas y animales, lo que nos permitiría usar sus recursos con mayor provecho (ROBINSON, 1978).

Estos beneficios del bosque tropical, por indispensables que sean, muchas veces no son considerados con el detenimiento que se merecen por el hecho de que no

producen directamente una ganancia monetaria. Sin embargo, el valor turístico del bosque tropical es otra de sus cualidades que, si es correctamente explotado, puede generar un ingreso monetario considerable.

Estas son algunas de las propiedades del bosque tropical que merecen considerarse en las políticas del uso del territorio tropical cuando hay otras necesidades que compiten por el uso de esta tierra.

2.2. Propiedades del suelo y su alteración

La tierra es un recurso limitado y limitante que debe ser racionalmente explotado para asegurar un rendimiento sostenido de productos o servicios. Si la conversión de bosques a usos agropecuarios acarrea cambios en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, estos cambios se deben analizar para determinar si son perjudiciales para un posible rendimiento sostenido.

2.2.1. Textura

El suelo se caracteriza generalmente por su textura, es decir, por el conjunto de arcilla, limo y arena que lo componen. La textura depende mucho más del material matriz que de los procesos activos de la formación del suelo como pueden ser el tiempo, el clima, o la vegetación (YOUNG, 1976). Posiblemente sea por su relativa estabilidad, que la textura no se ha incluido en la mayoría de los estudios del efecto del uso de la tierra sobre las propiedades físicas

del suelo (ALBERTS y WENDT, 1985; ALLEN, 1985; KANG y MOORMAN, 1977; LAL, 1976).

2.2.2. Densidad aparente

La densidad aparente (D_a), en cambio, fluctúa considerablemente con el uso y el manejo que se le da al suelo. Al talar el bosque, la D_a por lo general aumenta (POPENOE, 1957; ALLEN, 1985), especialmente si se utilizan métodos mecanizados (DIAS y NORTCLIFF, 1985). Al dejar el sitio de barbecho, con el tiempo la D_a vuelve a disminuir (AWETO, 1981a). Pero cuando el manejo del sitio resulta en una baja incorporación de residuos orgánicos, la D_a del suelo superficial se mantiene elevada (JUO y LAL, 1977).

La densidad aparente varía según la textura, la cantidad de materia orgánica, y su estado de compactación. Suelos con D_a mayores a $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ tienen un reducido espacio poroso que limita su capacidad de almacenar y conducir gases y agua. Para el crecimiento vegetal estos valores altos de D_a son limitantes (GONZALEZ, 1980). Generalmente los valores se encuentran entre $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, que aumentan de acuerdo con el grado de compactación. La materia orgánica, en cambio, hace descender la D_a , no solo por su propia densidad menor, sino porque ayuda en la estabilización de agregados del suelo, lo cual reduce la D_a . Cuando las operaciones de cultivo provocan una pérdida de materia orgánica o provocan la compactación del suelo, la D_a suele aumentar (THOMPSON y TROEH, 1982).

2.2.3. Porosidad

La porosidad de un suelo, que se calcula a partir de la D_a y la densidad de partículas (VOMOCIL, 1965), al igual que la D_a , disminuye al convertir el bosque a usos agropecuarios (CUNNINGHAM, 1963; DIAS y NORTCLIFF, 1985). La mejor manera de evitar este problema es asegurar que haya una incorporación adecuada de residuos orgánicos al suelo, o reducir el tiempo en que el suelo esté expuesto sin vegetación (LAL, 1975).

2.2.4. Retención de agua

Dependiendo de la textura, la D_a y la materia orgánica, los suelos tienen diferentes capacidades de retener agua en sus poros. La presencia de agua suficiente en el suelo es vital para el crecimiento de las plantas. La cantidad de agua que un suelo puede retener en forma utilizable por las plantas se denomina agua útil. Cuando el agua ha cesado su movimiento descendente, esta cantidad se llama capacidad de campo (CC). Este es el límite superior del agua disponible para las plantas. Al límite inferior, las plantas no pueden absorber agua a una velocidad suficiente para satisfacer sus necesidades y se marchitan irreversiblemente. Este punto se llama punto de marchitez permanente (PMP). Entre el PMP y la CC está el ámbito de agua disponible para las plantas, o el agua útil (THOMPSON y TROEH, 1982). AWETO (1981a, 1981b) encontró que la capacidad de retención de agua está relacionada a la

cantidad de materia orgánica y a la porosidad del suelo, y que, además, aumenta con la edad del barbecho.

2.2.5. Conductividad hidráulica

Otro aspecto físico importante del suelo es la conductividad hidráulica (CondH), o la velocidad con que permite el movimiento gravitacional del agua por sus poros. Este factor es especialmente importante en los trópicos donde la tasa de precipitación es la más alta del mundo y las lluvias se concentran en aguaceros voluminosos. Una CondH baja en estos casos, y particularmente en terrenos de ladera puede agravar el peligro de erosión. Suelos compactados por el laboreo o el ganado suelen tener valores bajos de CondH, y son susceptibles a la erosión (LAL, 1976). CHARREAU (1972) encontró que el factor principal que afecta la erosión es el tipo de cobertura, con los valores en suelos bajo cultivo, mayores a los valores de suelos bajo bosque. SUAREZ DE CASTRO y RODRIGUEZ (1955, 1958) encontraron un aumento en la erosión al ir de un cafetal viejo, a un cafetal nuevo, a un potrero, a un suelo sin cobertura vegetal. Sin embargo, una CondH muy alta en un suelo puede precipitar la pérdida de nutrientes mediante la lixiviación (NYE y GREENLAND, 1960).

2.2.6. Macronutrientes

Los nutrientes del suelo son un factor de suma importancia para el crecimiento de las plantas. El Nitrógeno (N), Fósforo (P), Calcio (Ca), y Magnesio (Mg),

denominados macronutrientes son necesarios en relativamente altas proporciones. Como estos son afectados por el uso del suelo (LAL et al, 1986) estos han sido estudiados extensivamente (NYE y GREENLAND, 1960; SANCHEZ, 1976). ALLEN, (1985) encontró que en general, al cortar un bosque, el N total y el Mg disminuyen significativamente, y que el Ca aumenta significativamente. También encontró que con el tiempo, solo el P vuelve a su nivel original. AWETO (1981a) encontró un aumento en todos los nutrimentos al aumentar la cantidad de materia orgánica devuelta al suelo por el barbecho. Según DE LAS SALAS y FOLSTER, (1976) la recuperación de K, Ca, y Mg mediante la hojarasca del barbecho, se logra solo después de períodos relativamente largos, en cambio la recuperación de N se incrementa por las altas tasas de fijación microbiana de N atmosférico.

La práctica de quemar el rastrojo después de talar el bosque para la agricultura, tiene diferentes efectos sobre los nutrimentos, dependientes de la temperatura, pero provoca menos pérdidas que aquellas provocadas por la lixiviación y la erosión después de la quema (EWEL et al, 1981).

Otro factor que influye en las cantidades de estos nutrimentos que se encuentran en el suelo, es la práctica de labranza, con valores más altos bajo prácticas de labranza mínima (JUO y LAL, 1979).

2.2.7. Micronutrientes

Los micronutrientes: cobre (Cu), cinc (Zn), manganeso (Mn), y hierro (Fe), son necesarios en proporciones más bajas. Estos también se ven afectados por el cultivo y el manejo del suelo. LAMBERT y ARNASON (1986) encontraron valores menores de Zn y Fe bajo bosque que bajo milpa. También encontraron que los micronutrientes fluctúan significativamente a lo largo del año, especialmente el Mn. KANG (1977) notó que los valores de Mn, Zn, y Fe fueron menores bajo palma de aceite (Elaeis guianensis), que bajo suelos aledaños. FAGAMI et al, (1985) notaron una correlación positiva entre la cantidad de materia orgánica y la cantidad de Zn disponible. También citaron el problema de deficiencias en los micronutrientes causadas por el cultivo continuo, la lixiviación, y la aplicación de fertilizantes NPK. También encontraron aumentos de Cu y Zn a mayor profundidad, coincidente con un aumento de arcilla. Incrementos en Cu fueron observados por KARIM et al (1976) bajo cultivos fumigados.

La capacidad que tiene un suelo de proveer a las plantas de los nutrientes necesarios se denomina la capacidad de intercambio catiónico. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), que corresponde a la suma de los iones de Ca, Mg, K, y la acidez disponible (o el Al intercambiable), es la manera más representativa de expresar el potencial nutricional de un suelo (NAS, 1975). El CICE depende en gran parte del contenido de materia

orgánica (NYE y GREENLAND, 1960; AWETO, 1981a, 1981b). BRAMS (1971) encontró una fuerte correlación entre la disminución de la materia orgánica después de la tala de un bosque tropical, y la disminución de la CICE. Esta disminución se puede ver exacerbada cuando el suelo es derivado de material matriz senil (ALLEN, 1985).

2.2.8. pH

Un factor que limita el potencial nutricional de un suelo es la acidez del suelo. En los trópicos la mayoría de los suelos se encuentran en el ámbito ácido. Con valores de pH menores de 5,5, el Al del suelo se solubiliza, y desplaza los demás nutrientes que de esta manera son susceptibles al lavado, y disminuye su disponibilidad (SANCHEZ, 1976). En cambio, la presencia de materia orgánica en un suelo no solo disminuye el peligro de erosión y lixiviación, sino que contribuye directamente al potencial nutricional del suelo (FOURNIER, 1970).

2.2.9. Materia orgánica

El tipo y cantidad de materia orgánica (MO) que recibe un suelo depende de la vegetación que en él crezca (NYE y GREENLAND, 1960; MILES, 1985). El contenido de MO es de importancia vital para el suelo. En primer lugar, por su influencia en la estructura, afecta las propiedades físicas como la aereación y la infiltración del agua, lo cual influye en la penetración de raíces y en la susceptibilidad a la erosión. En segundo lugar, la MO contiene cantidades

apreciables de los nutrimentos N, P, y S, y es además una fuente importante para la CICE (LATHWELL y BOULDIN, 1981).

La conversión de bosques tropicales a cultivos, trae consigo un descenso de 25-50% del contenido de MO (JONES, 1973), que a su vez provoca pérdidas de N, P y S, lo cual limita la productividad (KANG y MOORMAN, 1977; MUELLER-HARVEY, 1985). Sin embargo la aplicación de fertilizantes puede elevar el porcentaje de MO (SANCHEZ, 1976), y la práctica de incorporar el rastrojo al suelo, también puede asegurar niveles elevados de MO (YOUNG, 1976). Las pérdidas de MO se pueden reducir mediante la labranza mínima, y a la vez se reduce el peligro de erosión (JUO y LAL, 1979).

La vegetación juega un papel primordial no solo en el suministro de MO, sino en la formación del suelo (THOMPSON y TROEH, 1982), en el mantenimiento de la estructura del suelo (ALBERTS y WENDT, 1985; AWETO, 1981b), en la protección contra la erosión (ALBERTS et al, 1985), y en el mantenimiento de la fertilidad del suelo (KANG y MOORMAN, 1977;). Por esto es de suma importancia conocer los efectos específicos de los usos tradicionales del suelo como lo son el cultivo del café, de la caña de azúcar, y de pastos para el ganado.

2.3. El café, la caña de azúcar y el pastoreo en Costa Rica

El café (Coffea arabica) es un arbusto perenne cultivado en áreas con una estación seca de hasta 5-6 meses. Por esta razón el suelo en que crece debe tener una alta

capacidad de retención de agua, y preferiblemente ser un suelo profundo con buen drenaje, la textura debe ser moderadamente arcillosa y debe haber un alto contenido de MO (YOUNG, 1976).

Entre los cultivos responsables de la sustitución del bosque, los cultivos perennes como el café son los que mejor mantienen intacto el sistema de reciclaje de nutrimentos que existe en el bosque (NRC, 1982). A pesar de que los requerimientos nutricionales del café son relativamente altos, la biomasa en forma de frutos cosechada por unidad de área es relativamente baja (SANCHEZ, 1976).

En Costa Rica, el café se introdujo a finales del siglo XVIII. Para mediados del siglo XIX, Costa Rica era el principal exportador mundial de café (BOUCHER et al, 1983). Hoy el área dedicada a plantaciones de café es más de 81.000 ha. (HARTSHORN, 1982). Aunque esto solo es un 2,0% del territorio nacional, el cultivo del café representa un 37% en valor monetario de la exportación agropecuaria del país (HARTSHORN, 1982). El Valle Central de Costa Rica, donde se produce 70% del cultivo (BLUSTEIN et al, 1970), es considerado uno de los mejores sitios en el mundo para el cultivo del café (HALL, 1976).

Al igual que el café, la caña de azúcar (Saccharum officinarum) requiere un suelo con una alta capacidad de retención de agua y un buen drenaje. De los macronutrimentos requiere especialmente grandes cantidades de N. Por eso, su cultivo tiende a agotar el N del suelo y

a disminuir la MO (YOUNG, 1976). En términos de biomasa por unidad de área, la caña de azúcar es uno de los cultivos más productivos. Mientras que el cafetal produce 1,4 toneladas por hectarea en la cosecha anualmente, el cañal produce 55,2 toneladas (SANCHEZ, 1976), y junto con la biomasa cosechada, se pierden grandes cantidades de nutrimentos.

El cultivo de caña de azúcar en Costa Rica se vio incrementado después de que los EEUU impuso un bloqueo económico a Cuba, principal productor de azúcar. En la última década, el cultivo de caña de azúcar en Costa Rica ha continuado aumentando. En 1981 el área dedicada a caña de azúcar era de 48.000 ha, con un valor monetario de 2,7% de las exportaciones agropecuarias (HARTSHORN et al, 1982).

El uso de la tierra que mayor expansión ha disfrutado ha sido, sin lugar a dudas, la ganadería. El terreno dedicado a pastos excede el 43 % del territorio nacional (FOURNIER, 1985). No solamente hay tierras aptas para el cultivo en limpio que son subutilizadas para el pastoreo, sino que los pastos ocupan tierras aptas solo para cultivos perennes, por la susceptibilidad de sus suelos a la erosión, lo cual agrava este problema. Las tierras que son aptas únicamente para la producción permanente de maderas, se caracterizan por un alto riesgo de erosión. En las últimas dos décadas, estas tierras han sido extensivamente deforestadas y convertidas a pastos. En estos suelos, el pastoreo conduce a una rápida degradación del terreno. Aun tierras clasificadas como aptas para bosques de protección,

que requieren una protección absoluta, han sido convertidas para el pastoreo con consecuencias muy perjudiciales (HARTSHORN et al, 1982; TOSI, 1972; VASQUEZ, 1979). La mayor parte de la expansión del pastoreo ha sido precisamente a costa de los bosques, los cuales son convertidos a pastos a una tasa de $52.000 \text{ ha}\cdot\text{ano}^{-1}$ (PARSONS, 1983).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Descripción del sitio

Esta investigación se llevó a cabo en cuatro parcelas contiguas, bajo cultivo de café con sombra, caña de azúcar, pasto, y bosque secundario, respectivamente, en una ladera con una pendiente promedio de 40%, al pie de los montes La Cruz y Pico Blanco en San Antonio de Escazú, Costa Rica, a 1.500 msnm. El área está caracterizada como zona de vida de bosque húmedo premontano (TOSI, 1969), con una marcada estación seca de diciembre a abril (COEN, 1983). Los suelos del sitio han sido clasificados como Distropepts y Lithic Distropepts (VASQUEZ, 1979). Según la clasificación de TOSI (1986), la capacidad de uso de la tierra del área de estudio está clasificada como apta para cultivos arboreos, producción forestal extensiva, o bosque de protección.

La parcela de bosque tiene una pendiente entre 35-60%. Está dominada por Cedrela odorata, Nectandra globosa, y Croton gossypifolius. Según los campesinos del área, la parcela tiene unos 50 años de estar abandonada al crecimiento secundario. Previamente era un jardín que producía muy poco por tener un suelo muy pedregoso. Desde entonces no tiene manejo alguno. Ahora sirve de refugio de pajaros Bobo (Eumomota superciliosa), entre otras aves y pequeños animales.

La parcela de café (Coffea arabica) tiene una pendiente entre 20-35%, y está bajo sombra de banano (Musa

paradisiaca) y guaba (Inga sp.). La parcela tiene más de 50 años de estar bajo café. El cafetal nuevo tiene cuatro años. Es fertilizado con fórmula múltiple (100 kg ha^{-1}) en junio y con urea (100 kg ha^{-1}) en octubre. Se le aplica Poliboro y Cobre en julio. Una vez al año se le aplica el hierbicida Gramoxon.

La parcela de caña (Saccharum officinarum) tiene una pendiente entre 35-40%. Tiene 20 años de estar bajo caña. Previamente fue un cafetal viejo. Se fertiliza con fórmula múltiple de café dos veces al año. También se le aplica el fungicida Permatex dos veces al año.

El potrero tiene una pendiente entre 35-55%. La parcela tiene 50 años de estar bajo pasto. Previamente se cultivaba caña. El único manejo que se le da al potrero, es desmatonar de vez en cuando. Su uso desde hace muchos años es para el pastoreo de una yunta de bueyes.

3.2. Diseño experimental

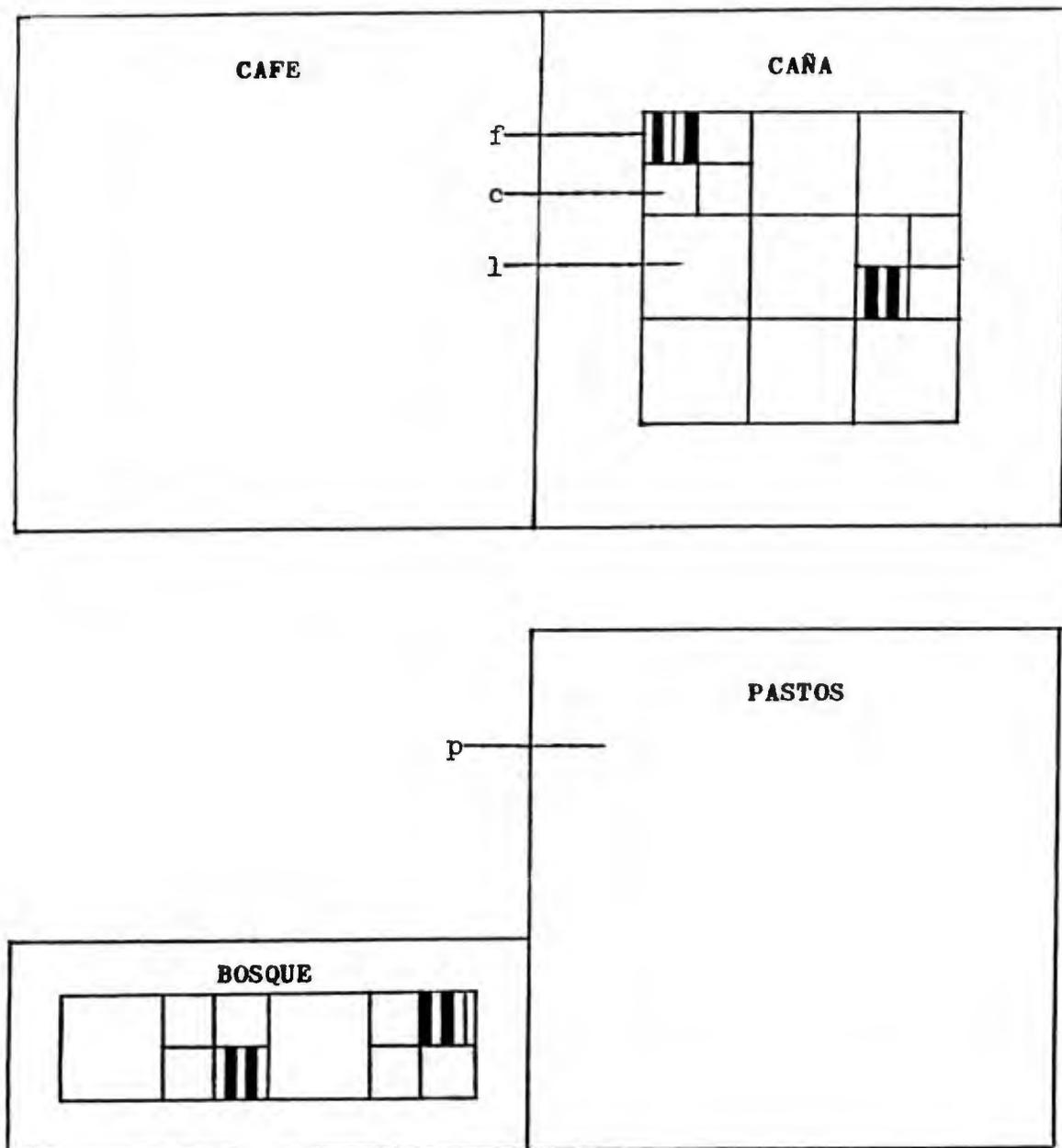
Las parcelas de café, de caña y de pasto son de 50m x 50m, y la de bosque secundario es de 20m x 50m debido a la escasez de parches más grandes de bosque en áreas agrícolas. En el perímetro de cada parcela se delimitó una faja en donde no se tomaron muestras, para evitar así los posibles efectos de borde. Para la parcela de bosque, por su menor tamaño, el borde fue de 5m, y para las demás fue de 10m.

Para efectos de muestreo, dentro de cada parcela se seleccionaron aleatoriamente 2 lotes de 10m x 10m, y en cada uno de estos lotes se escogió, también al azar, una

cuadrícula de 5m x 5m (Fig. 1). En cada cuadrícula, se escogieron aleatoriamente dos franjas de 1m x 5m, y dentro de cada franja se tomó una muestra de suelo entre 0-5cm y otra entre 25-30cm. Este proceso de escoger puntos de muestreo al azar y la recolección de muestras se efectuó en tres épocas: a mediados y a finales de la estación lluviosa, y a mediados de la estación seca; en agosto, noviembre y febrero, respectivamente, de los años 1986 y 1987. Este diseño experimental resulta con 4 repeticiones por profundidad/vegetación/época, o 12 repeticiones por profundidad/vegetación, o 24 repeticiones por vegetación, con un total de 96 muestras.

El propósito de aleatorizar el punto de muestreo en cada época, en vez de tomar las muestras posteriores de los mismos puntos escogidos en primera instancia, fue el de garantizar una muestra representativa espacialmente, aunque en perjuicio de la información obtenida con respecto al tiempo. Se hizo de esta manera para aumentar la confiabilidad de las diferencias entre los regímenes de uso de la tierra, que son el interés principal de este trabajo.

El muestreo se efectuó con una pala y un barrenador. Cada muestra, de aproximadamente 1 kg, se guardó en una bolsa plástica transparente para su análisis posterior. Las muestras que requerían ser intactas se tomaron con cilindros metálicos de una orilla afilada, con un diámetro interno de 4,8cm y una altura de 5cm.



Escala de 1:1500

Figura 1. Esquema de las parcelas (p) de café, caña, bosque y pastos; su división en lotes (l), cuadrículas (c), y franjas (f),
(4p x 2l x 1c x 2f x 2 prof. x 3 tiempos = 96 muestr.)

Las características que se evaluaron fueron las siguientes:

Físicas:

1. Textura
2. Densidad aparente y de partículas
3. Porosidad
4. Curva de retención de humedad
5. Conductividad hidráulica

Químicas:

1. Materia orgánica
2. pH
3. Aluminio intercambiable
4. Macronutrientes: N, P, K, Ca, y Mg
5. Micronutrientes: Zn, Mn, Cu, y Fe
6. Capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE)
7. Porcentaje de saturación de acidez

Biológicas:

1. Tasa de descomposición de materia orgánica
2. Fertilidad mediante prueba biológica

3.3. Propiedades físicas

Las propiedades físicas se analizaron en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Costa Rica. Previo al análisis, las muestras de suelo, salvo las intactas, se secaron al aire y se pasaron por un tamiz de 2mm.

3.3.1. Textura

La textura se midió mediante el método de Bouyoucos (SCHWEIZER et al, 1980). Se hizo sin la oxidación de la materia orgánica, pero con la defloculación mediante el uso de hexametáfosfato de sodio.

3.3.2. Densidad

La densidad aparente (D_a) se midió introduciendo un cilindro muestreador de volumen conocido en el suelo. Esta muestra intacta se secó en la estufa a 105°C hasta peso constante.

La densidad de partículas (D_p) se calculó a partir de la masa de una muestra y su volumen, por cálculo del volumen del agua desplazada por la muestra.

3.3.3. Porosidad o porcentaje de poros

El porcentaje total de poros se calculó partiendo de los valores de D_a y D_p con la fórmula: $(1 - (\text{Densidad aparente}/\text{Densidad de partículas})) \times 100$. (GONZALEZ, 1980).

3.3.4. Curva de retención de humedad

La retención de humedad a capacidad de campo (aguaCC), y la punto de marchitez permanente (aguaPMP) se determinó poniendo el suelo en ollas de presión bajo presiones de 1519,5 kPa y 33,8 kPa, respectivamente, por 24 horas. Después se secó el suelo a 105°C hasta peso constante, y por diferencia se calculó el porcentaje de agua. La diferencia entre el agua retenida a CC y al PMP es el agua útil (GAVANDE, 1972).

3.3.5. Conductividad hidráulica

Esta propiedad se midió en la muestra de suelo no alterada en un cilindro metálico. Se dejó saturar con agua de abajo hacia arriba para eliminar burbujas de aire. Una vez saturado, se puso el cilindro en un embudo y se llenó con agua hasta arriba. Entonces se midió el flujo de agua durante 30 min. La altura de agua se mantuvo constante. La conductividad hidráulica se calculó con la ecuación:

$CondH = Ql/Ath$, donde

CondH = conductividad hidráulica ($cm\ seg^{-1}$) a saturación

Q = flujo de agua (cm^3)

l = altura de columna de suelo

A = área (cm^2)

t = tiempo (seg)

h = altura de agua (cm) (GONZALEZ, 1980).

3.4 Propiedades químicas

Las propiedades químicas fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) con las metodologías descritas en su manual de análisis de suelos (SCHWEIZER et al, 1980).

3.4.1. Materia orgánica

La materia orgánica se midió de forma indirecta por combustión húmeda de carbono por el método de Walkley y Black. Se multiplicó el contenido de carbono orgánico por 1,72, que es el factor para la conversión de MO a partir del carbono (GONZALEZ, 1980).

3.4.2. pH

El pH se puede medir haciendo una solución del suelo en agua destilada o en KCl. La medición del pH en agua destilada, como se hizo para este trabajo, se refiere a la acidez debido a los iones de H y Al que se encuentran en el suelo. La medición se hizo con un potenciómetro.

3.4.3. Aluminio intercambiable

El Al intercambiable se midió en el suelo tratado con una solución de BaCl₂ y trietanolamina, y mediante titulación con HCl (SCHWEIZER et al, 1980).

3.4.4. Macronutrientes

Para el análisis del N se utilizó el método Kjeldahl modificado (BRICEÑO y PACHECO, 1984). Las muestras que se usaron para el análisis de nitrógeno (N) fueron muestras compuestas de las cuatro repeticiones, por cada profundidad, y por tipo de cobertura en el muestreo de febrero. Para las demás propiedades todas las muestras fueron analizadas por separado.

El P y el K se midieron con la solución extractora de Olsen modificado (SCHWEIZER et al, 1980).

El análisis de Ca Y Mg se realizó con un extracto hecho con una solución de KCl 1,0N y se midieron las concentraciones en el espectrofotómetro de absorción atómica (SCHWEIZER et al, 1980).

3.4.5. Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)

La CICE corresponde a la suma de los meq·100ml⁻¹ de solución de suelo de Ca, Mg, K, y Al disponible (BERTSCH, 1986).

3.4.6. Porcentaje de saturación de acidez

El porcentaje de saturación de acidez se calculó con la ecuación: %Sat.Acid.= (Al intercambiable/CICE) x 100 (BERTSCH, 1986).

3.4.7. Micronutrientes: Zn, Mn, Cu, y Fe

Estos elementos se determinaron directamente en el filtrado Olsen modificado, con el espectrofotómetro de absorción atómica (SCHWEIZER et al, 1980).

3.5. Propiedades biológicas

3.5.1. Descomposición de materia orgánica

La tasa de descomposición de materia orgánica se obtuvo al calcular el porcentaje de pérdida del área de hojas de café en los cuatro diferentes suelos. El suelo se obtuvo de los primeros 15cm. Para cada suelo se llenaron 2 macetas. En cada maceta se pusieron 5 hojas de café cortadas con las dimensiones de 5cm x 4cm. Semanalmente se extrajeron las hojas del suelo, y con una regla se midió el porcentaje del área descompuesta de cada hoja. Las macetas se regaron diariamente, para mantener el suelo húmedo. Esta prueba se llevó a cabo en condiciones de invernadero entre noviembre y febrero en Santa Ana a 900msnm.

3.5.2. Prueba biológica de fertilidad

Para esta prueba se tomó el suelo no alterado de los primeros 20cm. Para cada régimen de uso se llenaron cuatro macetas. En cada maceta se sembraron 5 granos de maíz. Al germinar, se dejaron las dos plántulas más grandes. Cada 5 días se midió la altura de las plantas, hasta tres meses después de sembradas. Entonces se cosecharon las plantas y se midió el peso seco del vástago y de la raíz. Con esto se calcularon las diferentes relaciones entre las variables: peso total/altura, peso de vástago/peso de raíz.

3.6. Análisis estadístico

Las variables estudiadas se sometieron a análisis de variancia (ANDEVA) para determinar diferencias significativas entre los cuatro regímenes de uso de la tierra, las dos profundidades, y los tres tiempos de muestreo (ver Apéndice). Con la prueba de Duncan se esclareció entre cuáles factores residían las diferencias significativas (PETERSEN, 1977; SWALLOW, 1984; DUNCAN, 1955).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Para el análisis de los resultados se parte de la suposición de que originalmente todos los suelos estudiados estuvieron bajo una cobertura de bosque. Por lo tanto, las diferencias en las propiedades del suelo se deben principalmente al uso y manejo del suelo consecuente a la eliminación del bosque

4.1. Propiedades físicas

Los resultados para este trabajo, en cuanto a propiedades físicas se resumen en Cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades físicas a dos profundidades bajo cobertura de bosque, café, caña, y pasto.

| Propiedad | prof | bosque | café | caña | pasto |
|---|------|------------|------|------|-----------|
| textura | 5 | Fa | F | F | F |
| | 25 | FA | FA | FA | F |
| limo:arcilla | 5 | 4,12 | 1,16 | 1,30 | 1,89 |
| | 25 | 1,04 | 0,79 | 1,11 | 1,20 |
| densidad partícula (g·cm ⁻¹) | 5 | 2,23 ** | 2,39 | 2,43 | 2,42 * |
| | 25 | 2,42 | 2,44 | 2,42 | 2,52 |
| densidad aparente (g·cm ⁻¹) | 5 | 0,76 ** | 1,06 | 1,05 | 1,11 |
| | 25 | 0,97 | 1,04 | 1,05 | 1,25 |
| porosidad (%) | 5 | 66,1 ** | 55,6 | 57,0 | 54,0 |
| | 25 | 58,2 | 57,2 | 56,7 | 50,4 |
| aguaCC (%) | 5 | 60,9 ** | 40,2 | 36,9 | 38,3 * |
| | 25 | 39,7 | 39,1 | 34,2 | 32,3 |
| aguaPMP (%) | 5 | 44,0 ** | 28,2 | 29,3 | 29,5 * |
| | 25 | 28,2 | 29,9 | 27,7 | 23,5 |

(continua)

| Propiedad | prof | bosque | café | caña | pasto |
|--------------------------------------|------|------------|-----------|------|-------|
| agua útil (%) | 5 | 16,9 ** | 11,9 * | 7,5 | 8,8 |
| | 25 | 11,5 | 9,2 | 6,5 | 8,8 |
| conduct.hidr. (cm hr ⁻¹) | 5 | 92,6 ** | 32,4 | 36,1 | 5,0 |
| | 25 | 44,3 | 25,1 | 22,3 | 4,9 |

Diferencias significativas entre profundidades son indicadas por un asterisco * ($P < 0,05$), o dos asteriscos ** ($P < 0,01$).

F=franco; FA=franco arcilloso; Fa=franco arenoso;

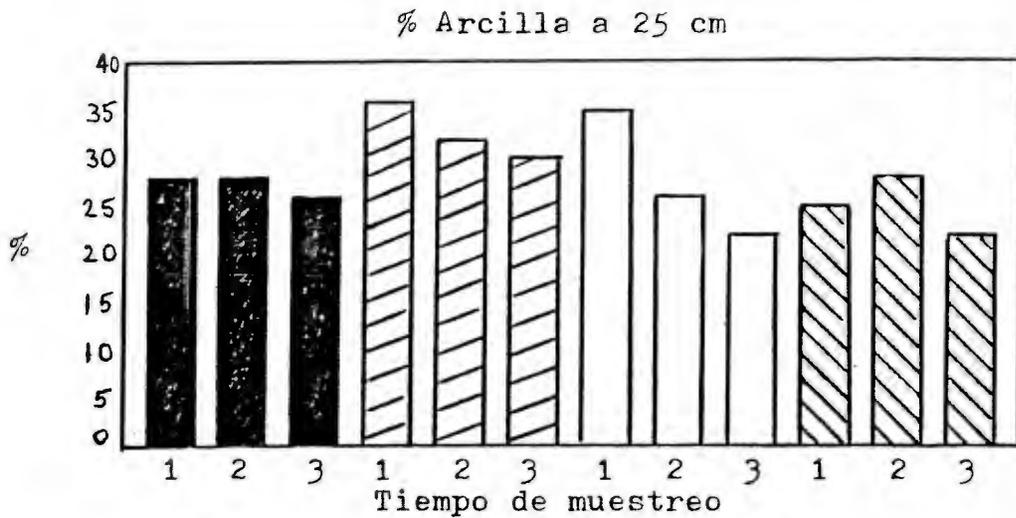
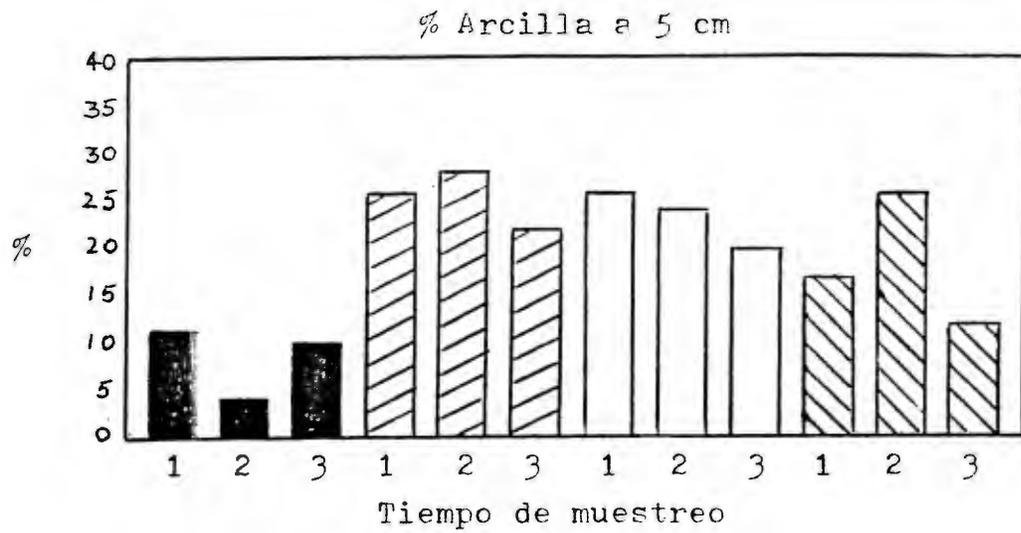
aguaCC=retención de agua a capacidad de campo

aguaPMP=retención de agua al punto de marchitez permanente

4.1.1. Textura

La textura de un suelo se refiere al porcentaje en peso de las tres fracciones minerales que lo componen: arena, arcilla y limo. Según YOUNG (1976), la textura es bastante estable, ya que depende más del material matriz que de los procesos activos de meteorización. Pero generalmente hay una diferencia de textura en el perfil, con mayor porcentaje de arcilla en el horizonte B que en el horizonte A, debido a la iluviación de la arcilla (BODMAN y CONSTANTIN, 1965).

En este trabajo, con respecto a la textura, a pesar de que todos los suelos estuvieron dentro de un ámbito franco, se encontró una diferencia significativa no solo entre profundidades ($P=0,01$), sino entre vegetaciones ($P=0,024$). Las fracciones que más contribuyeron a estas diferencias fueron las fracciones de arcilla (Fig. 2) y arena, ya que el limo permaneció generalmente alrededor de 30%, un nivel considerado alto para suelos tropicales de vocación forestal (YOUNG, 1976). Todos los suelos presentaron un aumento en



■ Bosque ▨ Café □ Caña ▩ Pasto

Figura 2. Arcilla a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

la arcilla con la profundidad, de acuerdo con lo observado por ADEOYE (1986) (Cuadro 2).

El suelo que presentó una mayor diferenciación textural con la profundidad fue el suelo bajo bosque (BQ), con una textura franca-arenosa a 5cm y franca-arcillosa a 25cm. El suelo que presentó una menor diferenciación fue el suelo bajo pasto (PS), que permaneció franco en ambas profundidades. El suelo cuya dinámica textural más se aproximó al del BQ fue el suelo bajo café (CF). El PS fue el que menos se aproximó. Es probable que el BQ conserve la textura original, y que las diferencias observadas en los suelos bajo las otras vegetaciones se deban a la menor incorporación de materia orgánica (MO), más que a la mayor intensidad de los procesos de meteorización, a pesar de que si se toma la relación de limo:arcilla como indicador de la edad, o grado de meteorización del suelo (VAN WAMBEKE, 1962), se encuentra que el BQ es el menos meteorizado, aunque todos los suelos están dentro del ámbito de suelos jóvenes de valores mayores a 0,15. Sin embargo, la diferencia del BQ con los demás suelos en cuanto a esta relación, reside exclusivamente en el suelo a 5cm, donde el porcentaje de arcilla es significativamente menor en el BQ. La diferencia significativa ($P < 0,01$) entre el bajo porcentaje de arcilla en el BQ a 5cm y los demás suelos, puede deberse principalmente a la abundancia de MO en el BQ a 5cm. Como el análisis de la textura se hizo sin la oxidación de la MO, la relativa abundancia de esta en el BQ

a 5cm puede ocasionar un sesgo hacia valores bajos de arcilla y valores altos de arena.

Es posible que para los otros suelos, al reducir la cantidad de MO que llega al suelo, lo cual ocurre al convertir el bosque a usos agropecuarios (CUNNINGHAM, 1963; NYE y GREENLAND, 1960), se deteriora la estructura del suelo, y junto con este deterioro, ocurre una mayor erosión (JUO y LAL, 1977; SANCHEZ, 1976), especialmente en suelos de vocación netamente forestal (TOSI, 1972). Este deterioro se evidencia especialmente en el PS, cuyo suelo es poco profundo, debido probablemente a una mayor erosión. También por esta posible mayor erosión, entre los suelos de uso agropecuario, la textura del PS tiene la menor cantidad de arcilla, ya que estas partículas son las más susceptibles de ser lavadas (THOMPSON y TROEH, 1982).

Cuadro 2. Textura a dos profundidades en suelos de Pico Blanco de Escazú bajo cobertura de bosque, café, caña y pasto.

| suelo | prof. | %arcilla | %arena | %limo | textura |
|-------|-------|----------|--------|-------|------------------|
| BQ | 5cm | 8 | 58 | 33 | franco-arenosa |
| CF | 5cm | 25 | 46 | 29 | franca |
| CN | 5cm | 23 | 47 | 30 | franca |
| PS | 5cm | 18 | 47 | 34 | franca |
| BQ | 25cm | 27 | 44 | 28 | franco-arcillosa |
| CF | 25cm | 33 | 42 | 26 | franco-arcillosa |
| CN | 25cm | 28 | 41 | 31 | franco-arcillosa |
| PS | 25cm | 25 | 45 | 30 | franca |

BQ=bosque; CF=café; CN=caña; PS=pasto.

4.1.2. Densidad de partículas

La Dp (densidad de partículas) es una propiedad relativamente estable del suelo. Tanto es así, que cuando no se tiene un dato específico para esta propiedad, se le asigna el valor de $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ (THOMPSON y TROEH, 1982). La Dp generalmente se encuentra entre $2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ y $2,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ para suelos minerales. Sin embargo, la presencia de una alta cantidad de materia orgánica, por su baja densidad propia, puede reducir la Dp hasta por debajo de $2,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ (GONZALES, 1980). En este trabajo la Dp varió entre $2,02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ y $2,64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$, valores algo inferiores a lo normal (Fig. 3). Esta discrepancia se puede deber a un secamiento insuficiente de las muestras. La metodología requiere que las muestras sean secadas a 105°C (SCHWEIZER *et al*, 1980), pero en este trabajo posiblemente se secaron a una temperatura menor, lo cual resultaría en valores bajos de Dp, especialmente evidente en las muestras de agosto y febrero. La sensibilidad de esta metodología al grado de secamiento del suelo, posiblemente sea responsable de la diferencia significativa ($P=0,0000$) en la Dp entre tiempos de muestreo.

El BQ tuvo una Dp promedio de $2,32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$, estadísticamente menor ($P<0,05$) a la Dp de los demás suelos que no fueron estadísticamente diferentes ($P=0,07$). Este valor bajo de la Dp en el BQ era de esperarse ya que la cantidad de MO sobre el suelo, a simple vista, fue mayor, lo cual suele reducir la Dp (GONZALEZ, 1980). Hubo, además,

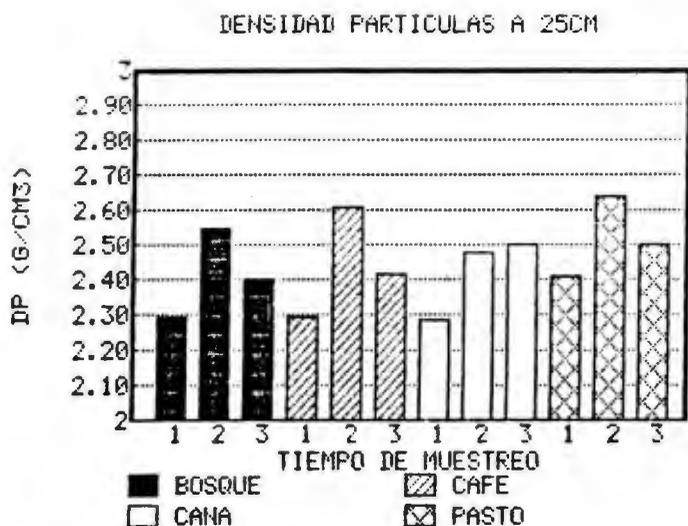
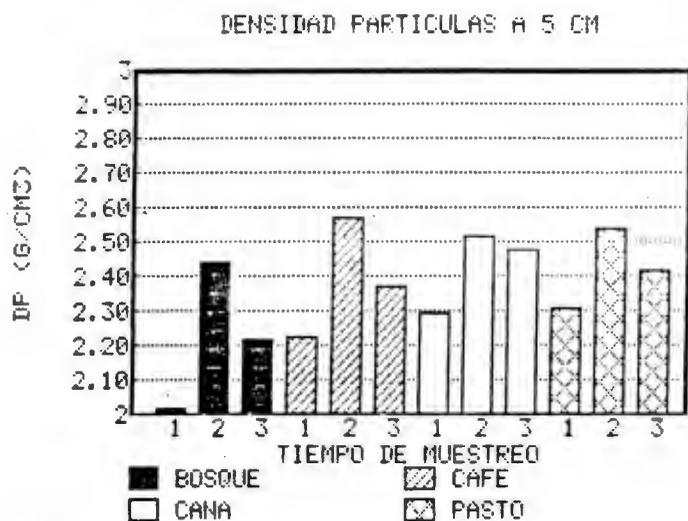


Figura 3. Densidad de partículas a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pasto

una diferencia significativa ($P=0,0001$) con respecto a la profundidad. La D_p aumentó a mayor profundidad, posiblemente por la reducción en la MO. La diferencia entre profundidades solo fue significativa ($P<0,05$) para el BQ y el PS, aunque las causas no fueron las mismas. En el BQ, la diferencia probablemente se debe a una abundancia de MO en la superficie, mientras que en el PS, la diferencia se debe seguramente a la poca profundidad del suelo que llega a solo 30cm donde topa con el material consolidado. Bajo café y caña no existe ninguna de estas condiciones, de ahí, la poca diferencia ($P>.11$) entre profundidades.

4.1.3. Densidad aparente

Otra medición de densidad es la D_a (densidad aparente) del suelo. La D_a también suele variar según la cantidad de materia orgánica presente y según la profundidad. Suele ser mayor en los subsuelos, no tanto por la escasez de materia orgánica, como por la mayor compactación (GONZALEZ, 1980). Generalmente, los suelos superficiales minerales tienen valores de D_a entre $1,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ y $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$, los suelos orgánicos con los valores más bajos. Un suelo es considerado denso si llega a tener una D_a igual o mayor a $2,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ (BLAKE, 1965).

En esta investigación se encontraron diferencias estadísticamente significativas de la D_a tanto entre coberturas vegetales ($P=0,0000$), como entre profundidades ($P=0,001$), pero no hubo una variación significativa ($P=0,38$) con respecto a la época del año (Fig. 4). La D_a del BQ fue

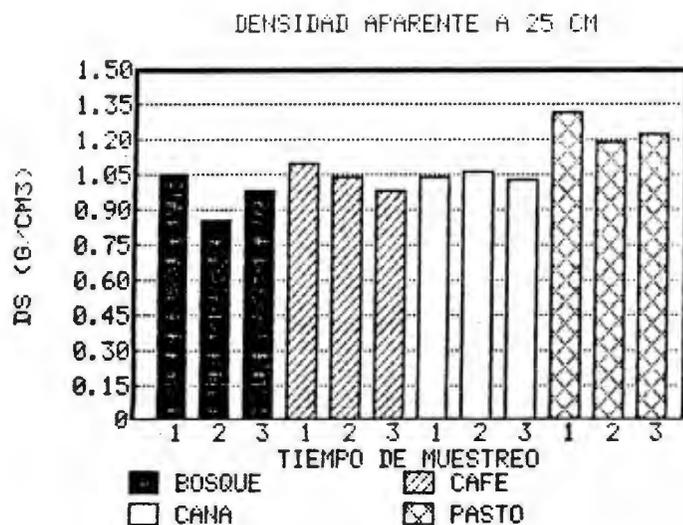
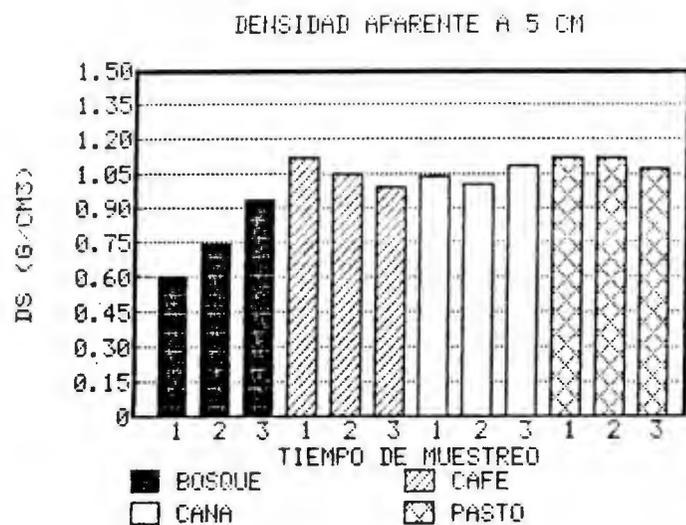


Figura 4. Densidad aparente a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pastos.

significativamente menor ($P < 0,01$) a la de los demás suelos. El CF y el CN tuvieron la misma D_s , y la D_a del PS fue significativamente mayor ($P < 0,05$) a la de los demás suelos. Solo la D_a del BQ no se encuentra dentro del ámbito típico (GONZALEZ, 1980) para suelos minerales, ni aun a 25cm, a pesar de ser el único suelo con una diferencia significativa entre profundidades ($P < 0,01$).

A pesar de que ninguno de los suelos llega a tener un valor de D_a que los caracterice como suelos densos (BLAKE, 1965), aun aumentos pequeños en la D_a pueden tener efectos deletereos sobre el crecimiento de las raíces (NICOU, 1972; TROUSE y HUMBERT, 1961). Un aumento en la D_a es un posible indicador de un deterioro en la estructura del suelo, lo cual puede llevar a una reducción en la aereación, en la permeabilidad, y en el grado de resistencia a la erosión (THOMPSON y TROEH, 1982). Entre las causas de este deterioro de la estructura, está el uso inadecuado de la tierra (TOSI, 1972), la fertilización excesiva, el uso de químicos persistentes, y el sobrepastoreo (HARTSHORN, 1982), los cuales todos son posibles factores influyentes en este trabajo.

Los valores relativamente bajos de D_a sugieren que, por lo general todos los suelos estudiados tienen una buena estructura, sin embargo, el PS presenta el mayor deterioro de esta característica. Este deterioro se debe probablemente a la compactación del suelo causado por el ganado. Es importante anotar que este potrero no presenta

un caso extremo de las tierras dedicadas a la ganadería en Costa Rica, pero sin embargo ya muestra cierto deterioro en el suelo. Donde la tierra está dedicada intensamente al pastoreo, bajo condiciones similares de pendiente y clima, el deterioro del suelo se agrava tremendamente, dando lugar a la erosión. Este fenómeno se sigue dando en grandes extensiones de nuestro país (PARSONS, 1976). Según ARSCOTT (1978), una tercera parte de la superficie del país experimenta una erosión extrema. HARTSHORN *et al* (1982) han calculado que anualmente en Costa Rica se pierden 680 millones de toneladas de tierra a causa de la erosión, y de esto el 84% se debe al área dedicada al pastoreo.

4.1.4. Porosidad

Un factor que está directamente ligado a la D_p y la D_a del suelo es la porosidad. Como era de esperarse, los valores de porosidad siguen básicamente el mismo patrón que los valores de D_a (Fig. 5). El BQ se diferencia de los demás ($P < 0,01$) con el nivel mayor de porosidad. El PS se diferencia de los demás ($P < 0,01$) con una porosidad mínima. El CF y el CN, con valores intermedios, no se diferencian estadísticamente entre sí ($P = 0,15$).

Con respecto a la profundidad, de nuevo solo el BQ tiene una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0,01$). Sin embargo, se puede ver que el PS sigue el mismo patrón del BQ, aunque con valores de porosidad indicativos de su mayor compactación. En el CF y el CN se encuentra alterado el patrón original del bosque, ya que no

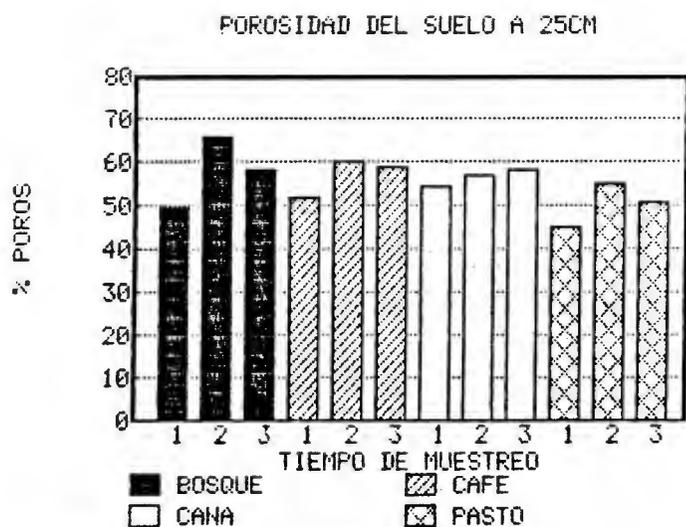
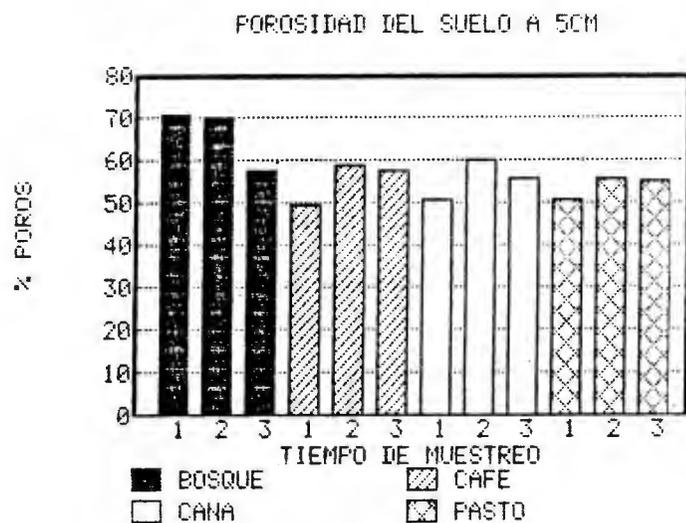


Figura 5. Porcentaje de poros a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

presentan una reducción significativa ($P > 0,13$) en su porosidad con la profundidad. Esta alteración posiblemente se deba a la intervención agrícola que experimentan estos dos suelos, ya que tanto en el cafetal como en el cañal se encuentran "cajones de recolección de agua", hoyos de aproximadamente 1m^3 llenos de rastrojo, hechos para recoger el agua superficial y evitar la erosión. Con esta incorporación de MO al subsuelo, la porosidad del CF y el CN a 25cm es igual ($P > 0,13$) al del BQ.

Ya que la porosidad se calcula a partir de los valores de D_p y D_a , el cambio de la porosidad del suelo con respecto a la época del año ($P = 0,0000$) refleja la variabilidad encontrada en la D_p , ocasionada por una deficiencia metodológica, y posiblemente refleja la variación espacial más que una verdadera variación con el tiempo.

4.1.5. Capacidad de retención de agua

Una propiedad del suelo que está íntimamente ligada a la D_a y a la porosidad, es la capacidad de retención de agua (JENNY, 1980; HAMBLIN, 1982). También se ve afectada por la cantidad de MO y por la cobertura vegetal (AWETO, 1981a, 1981b).

La capacidad de retención de agua se midió a dos niveles: a capacidad de campo (aguaCC) (Fig. 6), y al punto de marchitez permanente (aguaPMP) (Fig. 7). En ambos casos la capacidad de retención de agua varió de manera parecida a la porosidad. En ambos casos el BQ se diferenció de los demás suelos ($P < 0,01$) por tener las retenciones más altas.

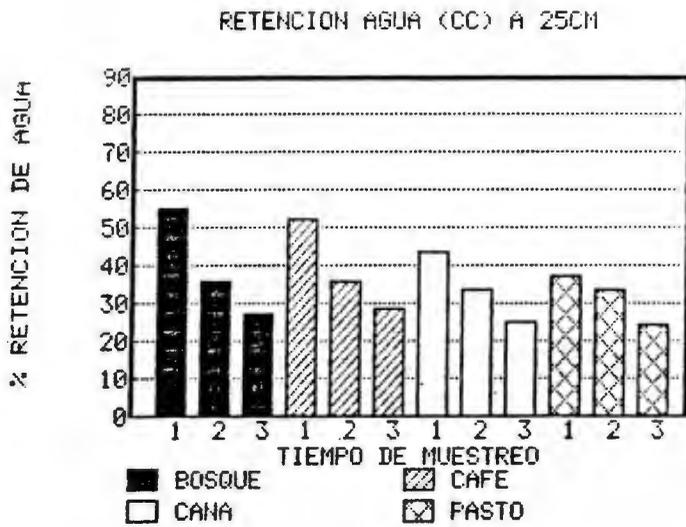
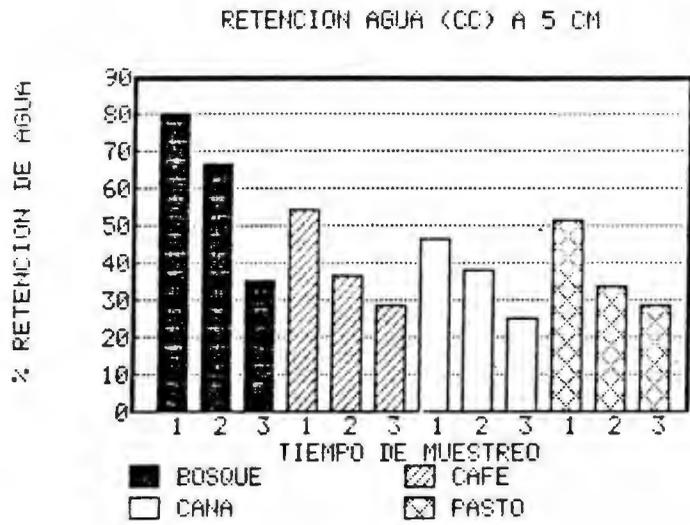


Figura 6. Retención de agua a capacidad de campo, a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pastos

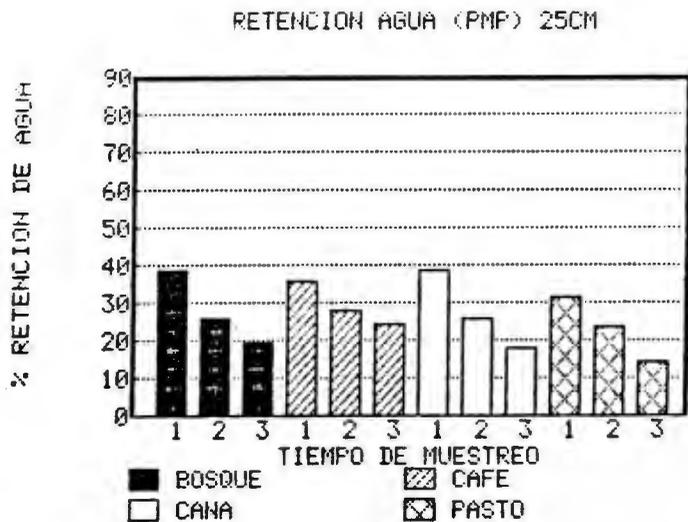
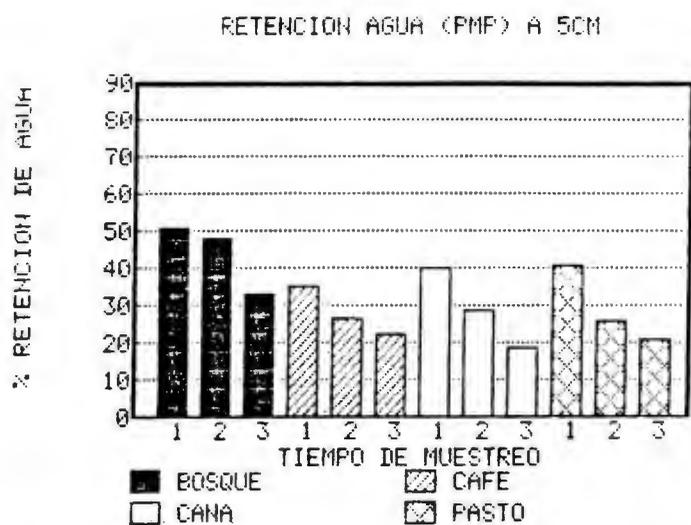


Figura 7. Retención de agua al punto de marchitez permanente, a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

A capacidad de campo el CF tiene una retención de agua significativamente mayor ($P < 0,05$) a la del CN y PS. Al punto de marchitez permanente, en cambio, el CF, CN y PS forman un grupo sin diferencias significativas ($P = 0,09$) entre sí.

Con la profundidad, la capacidad de retención de agua disminuye significativamente ($P = 0,0000$). Al igual que con la porosidad, el BQ es el que presenta la mayor diferencia ($P < 0,01$) entre profundidades, seguido por el PS, también con una disminución significativa ($P < 0,05$). En el CF y CN, esta propiedad varía muy poco ($P > 0,12$) entre profundidades. Inclusive, en el CF el aguaPMP aumenta levemente con la profundidad. Esta homogeneidad de retención de agua con respecto a la profundidad en el CF y CN, refleja la ausencia de diferencias drásticas en el perfil del suelo, como son la conspicua capa orgánica en el bosque, y el horizonte de material consolidado a poca profundidad en el PS.

A pesar de que la variación de las propiedades del suelo con la época del año es poco confiable debido al factor influyente de la variación espacial (SHARMA et al, 1980), en el caso de la retención de agua hay una tendencia significativa ($P = 0,0000$) de disminuir junto con la intensidad de la precipitación, de agosto a noviembre a febrero, de manera similar en todos los suelos estudiados (Fig. 8). Resultados similares han sido observados por MAPA et al (1986), con una reducción en la retención de agua de acuerdo con repetidos ciclos de humedecimiento y secado

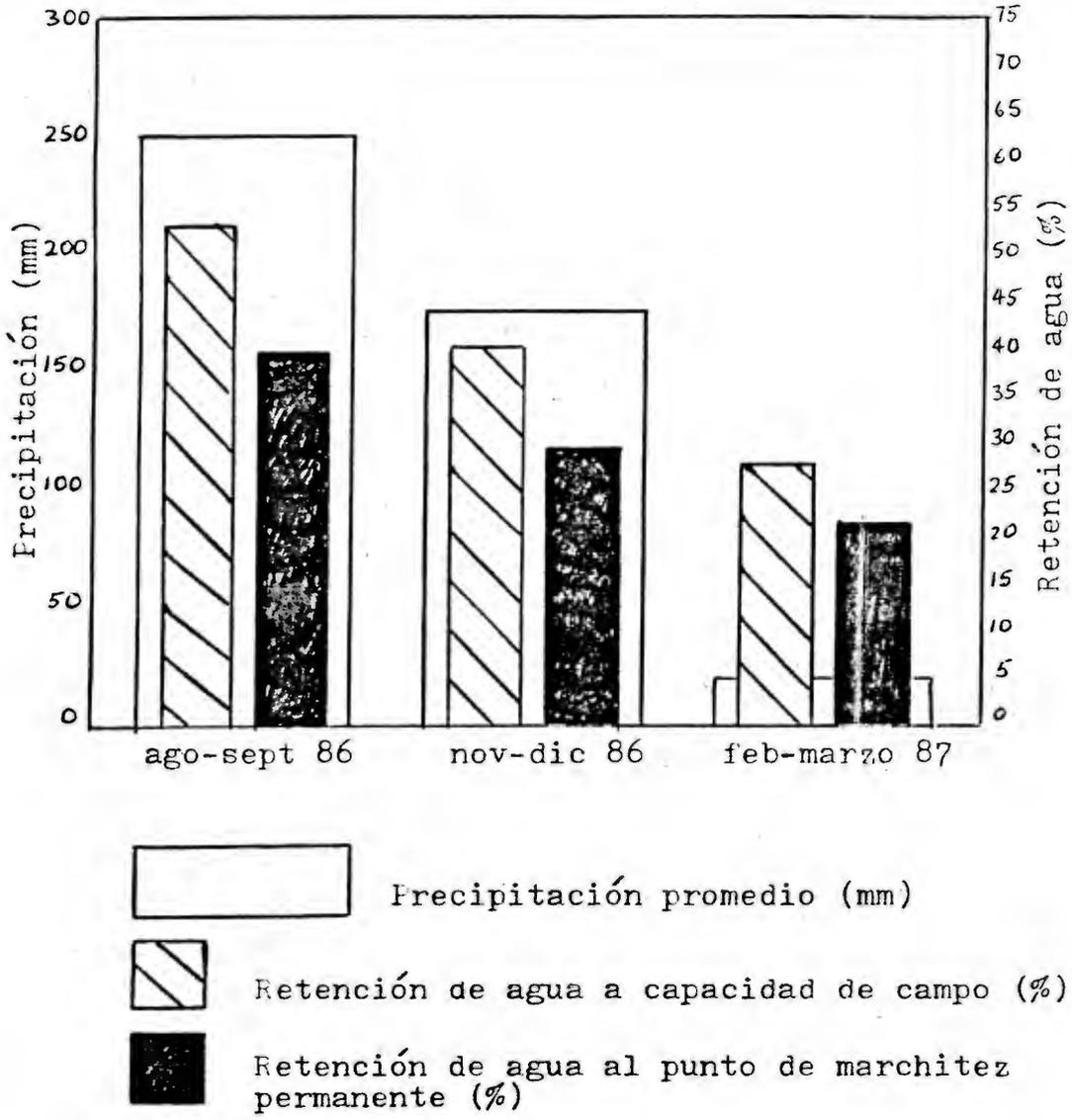


Figura 8. Precipitación y la variación en la retención de agua a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente

del suelo. Esta reducción en la retención de agua de acuerdo con la disminución de la precipitación puede deberse a una disminución en los macroporos que también se ven reducidos de acuerdo con los ciclos de humedecimiento y secado del suelo (HAMBLIN, 1982; MAPA et al, 1986)

La diferencia entre el aguaCC y el aguaPMP es el agua útil para el desarrollo de las plantas. Todos los suelos tuvieron diferencias significativas entre sí ($P < 0,05$) del agua útil, especialmente el BQ, que se diferenció de los demás ($P < 0,01$) con el valor más alto (Fig. 9). Después del BQ, el CF presentó la mayor retención de agua útil. El CN tuvo el nivel más bajo.

En cuanto a la profundidad, los únicos suelos que presentaron una disminución significativa del agua útil, fueron el BQ ($P < 0,01$) y el CF ($P < 0,05$). Sin embargo, con esta reducción, la cantidad de agua útil a 25cm sigue mayor a la de CN y PS.

4.1.6. Conductividad hidráulica

Los poros del suelo, además de influir sobre el almacenamiento de agua, también permiten su movimiento en el perfil. Esta capacidad de movimiento de agua por un suelo saturado se denomina conductividad haidráulica (CondH). La CondH es afectada no solo por la porosidad del suelo, sino por la textura, la Da, la estructura y la materia orgánica (SCHWEIZER et al, 1980). La CondH a su vez afecta directamente los problemas de escorrentía y erosión. Los

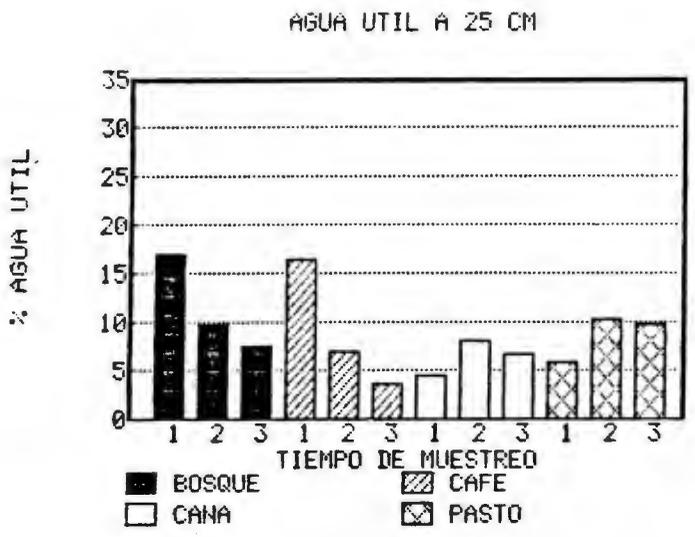
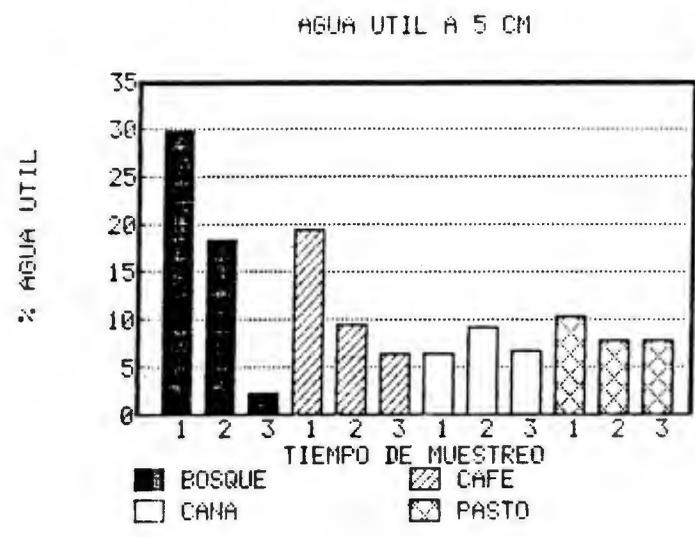


Figura 9. Retención de agua útil a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

suelos con menor CondH son los más susceptibles a problemas de erosión (GAVANDE, 1972).

En este trabajo la CondH varió significativamente ($P=0,0000$) entre los diferentes suelos, con los valores más altos en el BQ y los más bajos en el PS (Fig. 10). El CF y CN tuvieron valores intermedios, sin diferencias significativas entre sí ($P=0,17$). SUAREZ DE CASTRO y RODRIGUEZ (1958) obtuvieron resultados parecidos, con un descenso en la CondH al ir de un cafetal viejo en barbecho, a un cafetal joven, a un potrero.

Con respecto a la profundidad, solo el BQ mostró un descenso significativo ($P<0,01$). Los demás suelos presentaron una disminución, pero no estadísticamente significativa ($P>0,12$)

La textura del suelo afecta la CondH, con los valores mayores en los suelos de textura más arenosas, y generalmente con los valores menores en los suelos con texturas más arcillosas. Sin embargo, el PS que tiene una textura franca, presenta la CondH más baja. Esto reconfirma que el suelo más deteriorado es el PS, a pesar de su poca explotación. La CondH baja en el PS puede presentar un problema de escorrentía superficial y de erosión. Es probable que el factor principalmente responsable de esta baja CondH, y consecuentemente del peligro de erosión, sea la compactación ocasionada por el paso del ganado. Una CondH baja es especialmente agravante en laderas, ya que en estas condiciones el peligro de erosión es mucho mayor

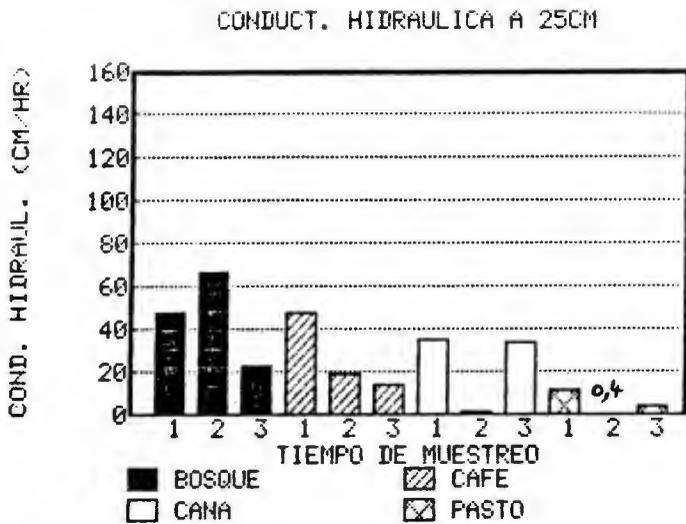
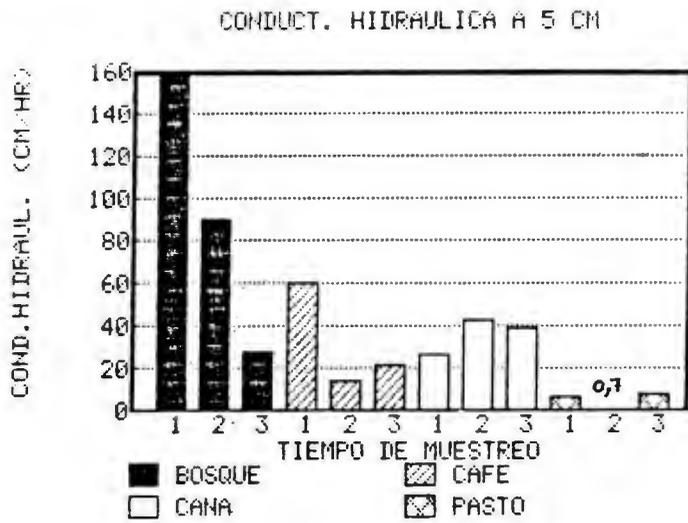


Figura 10. Conductividad hidráulica a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

(SANCHEZ, 1976). En las laderas estudiadas el suelo que menos enfrenta el peligro de erosión es el BQ, por su alta CondH. Para el CF y el CN, con sus valores de CondH más de un 50% más bajos que el BQ, el peligro de erosión también está presente, aunque menos que en el PS. El hecho de que la profundidad del suelo bajo cobertura de pasto sea de aproximadamente solo 30cm en contraste con los suelos bajo cobertura de bosque, café y caña con profundidades generalmente mayores de 1m, parece indicar que efectivamente el PS ha sufrido una mayor erosión.

La variación en la CondH con los diferentes tiempos de muestreo puede deberse a la variabilidad espacial de esta propiedad, ya que el patrón de variación con el tiempo es diferente para cada suelo. WARRICK y NIELSON (1980) encontraron que entre las propiedades físicas, la CondH presentó la variación espacial más alta.

4.1.7. Conclusiones

Con respecto a las propiedades físicas del suelo, en esta investigación se encontró que sin excepción, los valores más favorables se mostraron en el suelo bajo cobertura de bosque (BQ) (Cuadro 3). Para la mayoría de estas propiedades, el suelo bajo cobertura de pasto (PS) presentó valores al extremo opuesto de los del BQ. Los suelos bajo cobertura de café (CF) y los suelos bajo cobertura de caña de azúcar (CN) generalmente tuvieron valores intermedios entre el BQ y el PS.

Cuadro 3. Diferencias significativas de las propiedades físicas del suelo entre terrenos de Pico Blanco de Escazú bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos.

| Propiedad | Suelos | | | |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| Arcilla (%) | BQ 17,8a | PS 21,8b | CN 25,3c | CF 28,8d |
| Arena (%) | BQ 51,5a | PS 46,2b | CN 44,4b | CF 43,9b |
| Limo (%) | PS 32,0a | BQ 30,6ab | CN 30,2ab | CF 27,2b |
| Dp (g·cm ⁻¹) | BQ 2,32a | CF 2,42b | CN 2,43b | PS 2,47b |
| Da (g·cm ⁻¹) | BQ 0,86a | CF 1,05b | CN 1,05b | PS 1,18c |
| Porosidad (%) | BQ 62,1a | CN 56,8b | CF 56,4b | PS 52,2c |
| aguaCC (%) | BQ 50,3a | CF 39,6b | CN 35,5c | PS 35,3c |
| aguaPMP (%) | BQ 36,1a | CF 29,0b | CN 28,5b | PS 26,5b |
| Agua util (%) | BQ 14,2a | CF 10,6b | PS 8,80c | CN 7,00d |
| CondH (cm·hr ⁻¹) | BQ 68,6a | CN 29,3b | CF 28,7b | PS 5,00c |

suelos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí; BQ=bosque; CF=café; CN=caña; PS=pasto; Dp=densidad de partículas; Da=densidad aparente; aguaCC=retención de agua a capacidad de campo; aguaPMP=retención de agua a punto de marchitez permanente; CondH=conductividad hidráulica

La diferencia en las propiedades físicas entre las dos profundidades es evidente en el BQ, donde la diferencia en el perfil del suelo se debe a la conspicua capa orgánica en la superficie. El PS también mostró cierta variabilidad en sus propiedades físicas con respecto a la profundidad. Pero la diferencia en su perfil se debe principalmente a la escasez de su profundidad, ya que el suelo topa con el material consolidado a solamente 30cm.

Esta poca profundidad del suelo bajo cobertura de pasto es un posible indicio de una erosión significativa. De hecho, los valores bajos de porosidad, y conductividad hidráulica y los valores altos de densidad aparente en el PS son agravantes al problema de la erosión. La causa principal de estos valores es probablemente la compactación causada por el paso del ganado.

En resumen, los factores físicos que en los terrenos cubiertos con café, caña de azúcar o pastos mostraron diferencias significativas con respecto al suelo cubierto de bosque, en general afectan de manera negativa a las condiciones del suelo.

4.2. Propiedades químicas

Las propiedades químicas de un suelo representan una conexión esencial entre la fertilidad y los aspectos físicos del suelo (THOMPSON y TROEH, 1982). Sin embargo, tradicionalmente al caracterizar un suelo, los enfoques han sido hacia uno u otro de estos aspectos (SANCHEZ, 1976). Para una mejor comprensión del efecto total que tiene el uso sobre el suelo, es preferible abarcar una amplia gama de propiedades. Los resultados para este trabajo, en cuanto a propiedades químicas, se resumen en Cuadro 4.

Cuadro 4. Propiedades químicas a dos profundidades en suelos de Pico Blanco de Escazú, bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar y pastos.

| Propiedad | Prof. | BQ | CF | CN | PS |
|-----------------------------------|-------|------------|-----------|------------|-----------|
| MO (%) | 5 | 10,9 ** | 6,3 ** | 5,9 ** | 6,6 ** |
| | 25 | 4,4 | 4,7 | 4,3 | 3,1 |
| pH | 5 | 6,0 * | 5,3 | 5,5 | 5,8 |
| | 25 | 6,2 | 5,3 | 5,4 | 5,7 |
| Al (meq·100ml ⁻¹) | 5 | 0,16 | 0,25 | 0,24 ** | 0,19 |
| | 25 | 0,14 | 0,29 | 0,54 | 0,31 |
| N # (meq·100ml ⁻¹) | 5 | 0,59 | 0,32 | 0,27 | 0,35 |
| | 25 | 0,42 | 0,18 | 0,24 | 0,13 |
| C:N # | 5 | 10,7 | 11,4 | 12,7 | 11,4 |
| | 25 | 10,7 | 15,2 | 10,4 | 13,9 |
| P (ug·g ⁻¹) | 5 | 6,7 * | 7,1 | 9,5 | 7,7 |
| | 25 | 4,6 | 5,7 | 9,1 | 6,9 |

(continua)

| Propiedad | Prof. | BQ | CF | CN | PS |
|------------------------------------|-------|------------|-------------|------------|------------|
| K (meq·100ml ⁻¹) | 5 | 0,80 ** | 0,85 | 0,91 ** | 0,35 |
| | 25 | 0,43 | 0,75 | 0,40 | 0,21 |
| Ca (meq·100ml ⁻¹) | 5 | 14,8 ** | 9,1 * | 8,6 | 10,8 ** |
| | 25 | 12,7 | 7,3 | 7,2 | 17,4 |
| Mg (meq·100ml ⁻¹) | 5 | 4,2 | 2,3 | 2,3 | 5,3 ** |
| | 25 | 3,9 | 2,0 | 2,3 | 6,4 |
| Ca/K | 5 | 20,0 * | 9,4 | 9,6 | 37,1 ** |
| | 25 | 50,0 | 17,8 | 22,6 | 120,8 |
| Ca/Mg | 5 | 3,6 | 4,2 | 3,7 | 2,0 * |
| | 25 | 3,2 | 3,9 | 3,2 | 2,7 |
| Mg/K | 5 | 5,7 | 3,3 | 2,5 | 18,5 ** |
| | 25 | 15,2 | 5,3 | 7,0 | 45,5 |
| CICE (meq 100ml ⁻¹) | 5 | 19,9 ** | 12,5 * | 12,0 | 16,6 ** |
| | 25 | 17,2 | 10,2 | 10,4 | 24,2 |
| Sat.acidez (%) | 5 | 0,83 | 2,02 | 2,07 ** | 1,16 |
| | 25 | 0,82 | 2,87 | 5,89 | 1,41 |
| Mn (ug g ⁻¹) | 5 | 3,4 | 18,0 ** | 15,3 ** | 11,9 |
| | 25 | 4,6 | 7,0 | 8,6 | 8,4 |
| Zn (ug g ⁻¹) | 5 | 4,8 | 6,7 | 4,6 | 4,2 |
| | 25 | 3,4 | 5,2 | 5,3 | 3,5 |
| Cu (ug g ⁻¹) | 5 | 3,1 | 14,4 | 12,5 | 5,8 |
| | 25 | ** 9,5 | ** 18,4 | | * 3,6 |
| Fe (ug g ⁻¹) | 5 | 27,5 | 105,0 ** | 92,6 | 85,1 ** |
| | 25 | 40,3 | 84,9 | 91,8 | 30,9 |

Asteriscos muestran diferencias significativas entre profundidades: *(P<.05); **=(P<.01).

BQ=bosque, CF=cafe, CN=cana, PS=pastos

#=no hay informacion para calcular dif. sig.

4.2.1. Materia orgánica

En general, con respecto a propiedades químicas, el efecto que tiene la conversión de bosques a usos agropecuarios, es negativo (NYE y GREENLAND, 1960; SANCHEZ, 1976). Sin embargo, al dejar la tierra en barbecho, la mayoría de estas propiedades se recuperan (AWETO, 1981a; DE LAS SALAS y FOLSTER, 1976). Una causa de esta recuperación paulatina, puede ser el aumento en el suministro de materia orgánica (MO) al suelo. Algunas de las características de la MO son: 1) su capacidad de proveer la mayor parte de la capacidad de intercambio catiónico en suelos ácidos, 2) su capacidad de formar complejos con micronutrientes, y evitar su lixiviación, y 3) su condición de fuente principal de nitrógeno, fósforo y azufre (GREENLAND y DART, 1972). En términos generales, la presencia de MO es beneficiosa para el suelo, sin embargo, una sobreabundancia puede elevar la acidez del suelo, y así facilitar la solubilidad de ciertos nutrientes, y de esta manera aumentar el riesgo de su lixiviación (BERTSCH, 1986).

Generalmente, el porcentaje de MO varía entre 1% y 6% (THOMPSON Y TROEH, 1982), sin embargo JENNY et al (1948) encontraron valores sustancialmente mayores en algunos inceptisoles de Colombia y Costa Rica.

En este trabajo, la MO fue significativamente mayor ($P < 0,01$) en el BQ que en los demás suelos, que presentaron porcentajes estadísticamente similares ($P > 0,07$) (Fig.11). La disminución de la MO al convertir el bosque a usos

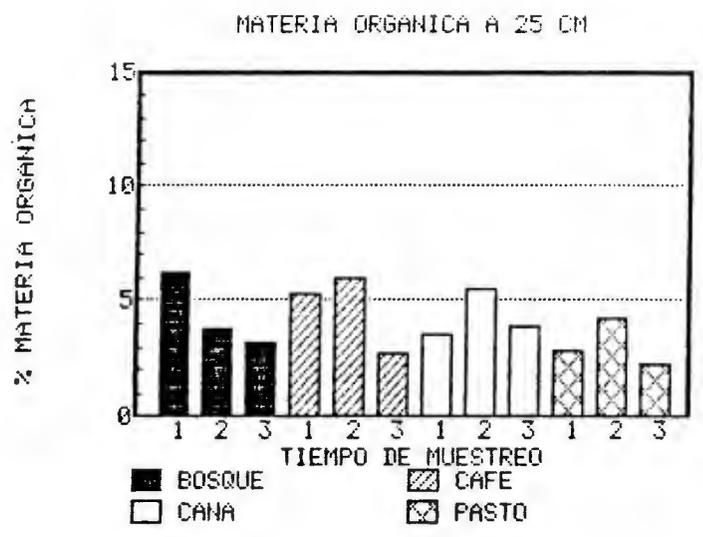
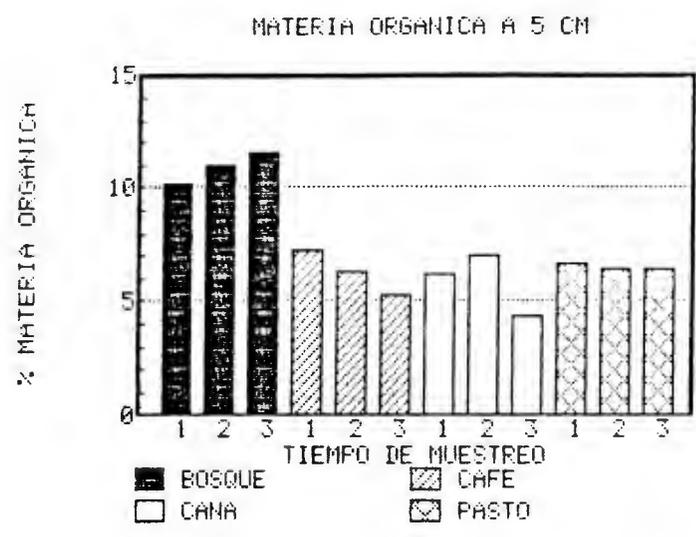


Figura 11. Materia orgánica a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

agropecuarios, está ampliamente documentada (NYE y GREENLAND, 1960; SANCHEZ, 1976; BARTHOLOMEW, 1975; ALLEN, 1985). Esta disminución puede deberse a la forma en que se limpió el bosque (JUO y LAL, 1979), a la reducción en el suministro de hojarasca por la vegetación, o al aumento en la intensidad de los procesos de oxidación, concomitantes a la tala del bosque (YOUNG, 1976). Los efectos de esta disminución en la MO pueden ser multitudinarios, como ya se vieron algunos en cuanto a las propiedades físicas (Fig. 12).

La variación de MO con la profundidad del suelo fue generalizada, con una disminución significativa ($P < 0,01$) en todos los suelos. Sin embargo, al comparar el porcentaje de MO a los 25cm de todos los suelos, solo el PS se diferenció significativamente ($P < 0,05$) con un valor mínimo.

La MO varió significativamente ($P = 0,0000$) con respecto a la época del año, aumentando conforme avanzaba la estación lluviosa, para volver a bajar a un mínimo durante la estación seca. FOURNIER y CAMACHO DE CASTRO (1973) encontraron una variación opuesta a esta en la producción del mantillo en un bosque húmedo del premontano a 1200 msnm, seguramente por tratarse de un bosque con árboles que pierden sus hojas durante la época seca. En el presente trabajo, la fluctuación con el tiempo de la MO no sigue el mismo patrón en todos los suelos. Esto puede indicar que existe una interacción entre el régimen de uso y el tiempo. Sin embargo, es muy probable que la fluctuación con el

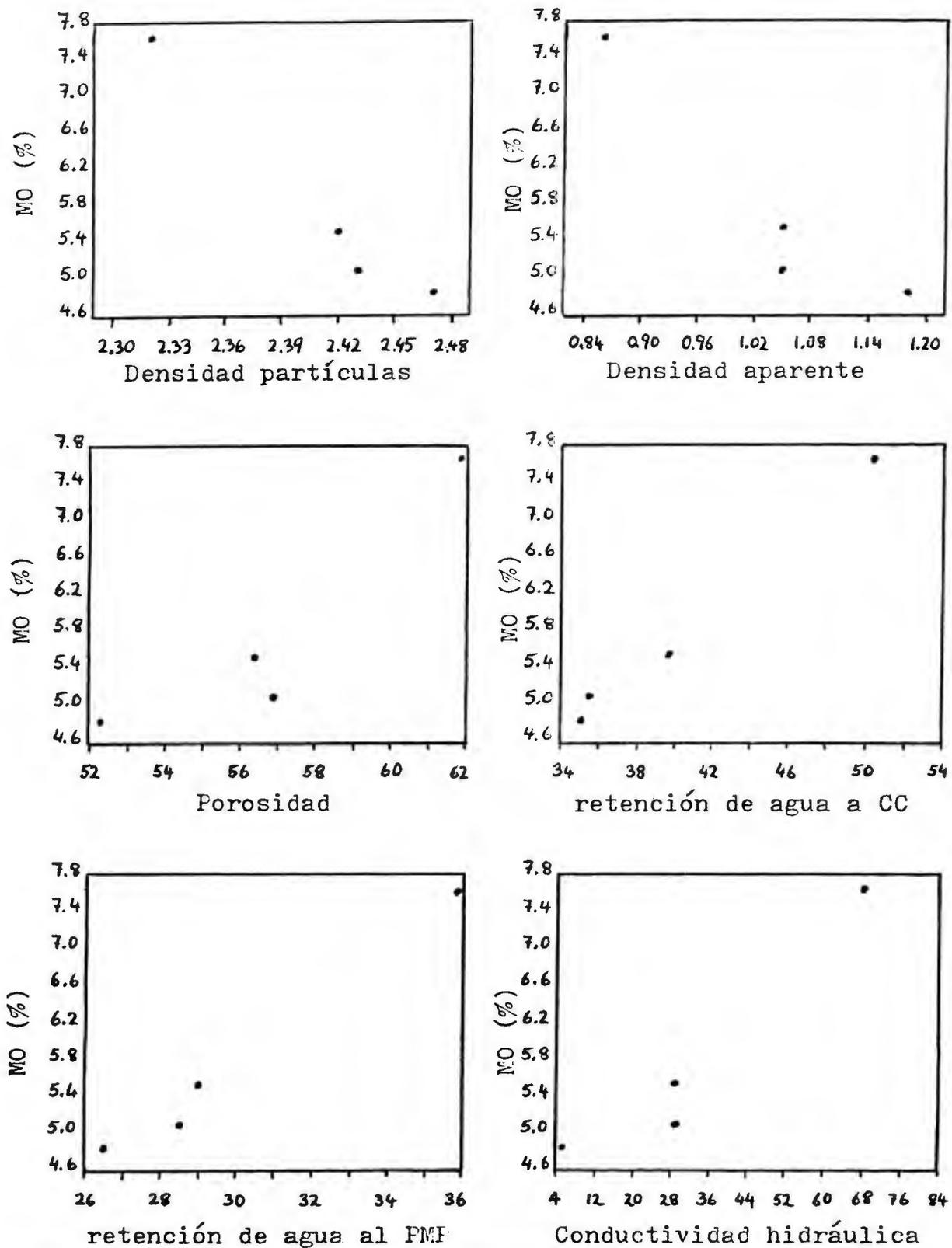


Figura 12. Correlación de la materia orgánica (MO) y las propiedades físicas del suelo.

CC=Capacidad de campo

PMP=Punto de marchitez permanente

tiempo de muestreo se deba a una variación espacial, por los diferentes puntos de muestreo en las diferentes épocas.

4.2.2. Acidez del suelo

Los suelos tropicales en su gran mayoría son ácidos (NAS, 1975). El aluminio intercambiable es el principal catión responsable de esta acidez (COLEMAN y THOMAS, 1967), ya que a niveles de pH mayores de 5,5 a 6,0 el aluminio es insoluble. Los suelos tropicales con valores de pH por encima de 5,5 no presentan problemas de acidez; por debajo de este valor, la acidez provoca una disminución en la fertilidad del suelo (SANCHEZ, 1976).

En este trabajo el pH del suelo varió significativamente ($P=0,0000$) con el tipo de cobertura vegetal (Fig. 13). El pH del BQ fue significativamente mayor ($P<0,01$) al de los otros suelos. En segundo lugar estuvo el PS con un pH por encima del valor crítico de 5,5, y significativamente ($P<0,01$) más alto al del CF y CN, ambos con valores inferiores al valor crítico.

Una de las causas de la acidificación del suelo es la aplicación prolongada de fertilizantes nitrogenados (THOMPSON y TROEH, 1982), como ha sido el caso para ambos el CF y el CN. La mayor acidificación de suelos cultivados ha sido documentada por otros investigadores (SANCHEZ *et al*, 1982; KANG y MOORMAN, 1977).

Generalmente el pH disminuye con la profundidad, debido al calcio intercambiable incorporado a la vegetación y depositado como hojarasca en la superficie (BRASELL y

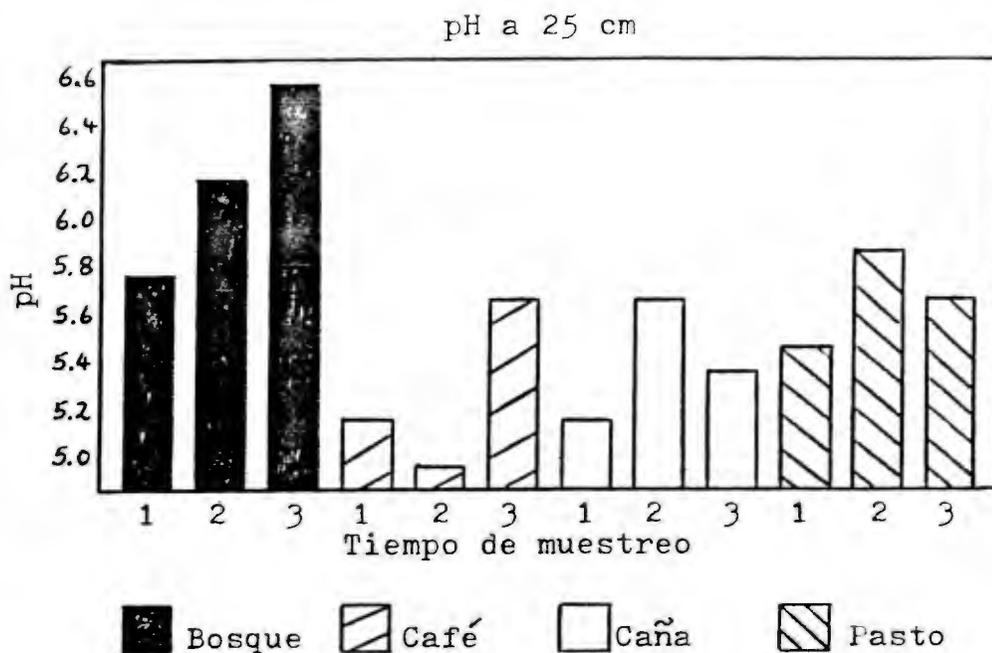
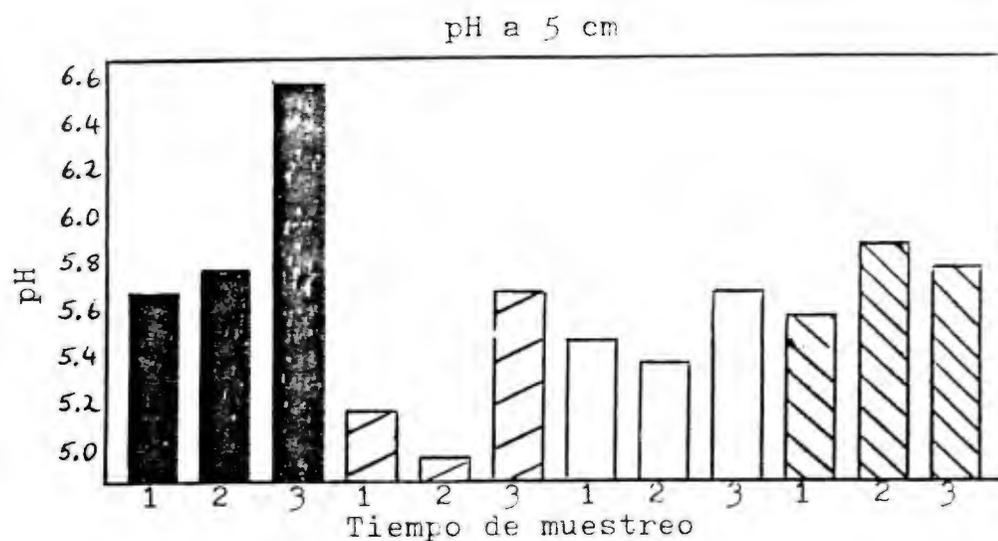


Figura 13. pH a dos profundidades, en tres épocas, de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña, y pastos; (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero)

SINCLAIR, 1983). Sin embargo, en el BQ, el único con una diferencia significativa ($P < 0,01$) en el pH entre profundidades, se presenta un aumento con la profundidad. Esto probablemente se deba a la acidez causada por la abundancia de MO en la superficie (Fig. 11).

Son precisamente los suelos con los valores de pH más bajos, los que sufren de las mayores concentraciones de aluminio intercambiable (Fig. 14). Las diferencias significativas entre suelos son entre el BQ con un valor mínimo ($P < 0,05$), y el CN con un valor máximo ($P < 0,01$). El PS y el CF, con valores intermedios, no presentaron diferencias significativas entre sí ($P = 0,14$). El hecho de que el BQ tenga los valores más bajos de aluminio intercambiable a 5cm, reconfirma que el aumento de acidez que presenta en la superficie se debe no al aluminio, sino a la MO.

La variación del Al con el tiempo presenta generalmente el mismo patrón en todos los suelos, lo cual aumenta la confiabilidad de que el tiempo, en efecto, es el factor influyente. El Al parece variar de forma inversa a la intensidad de la precipitación. De agosto a septiembre, cuando la precipitación es de 250mm, el Al presenta los valores más bajos; de noviembre a diciembre, con una precipitación de 175mm, el Al presenta valores intermedios; y de febrero a marzo, con una precipitación mínima de 20mm, el Al presenta los valores más altos, debido a que su lavado es menor.

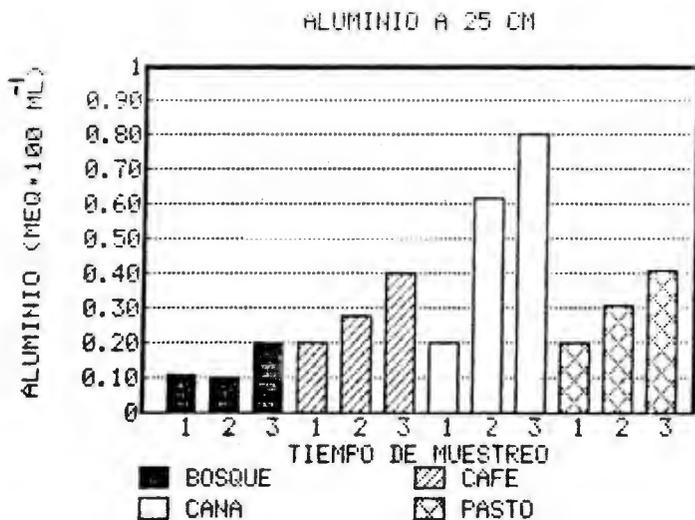
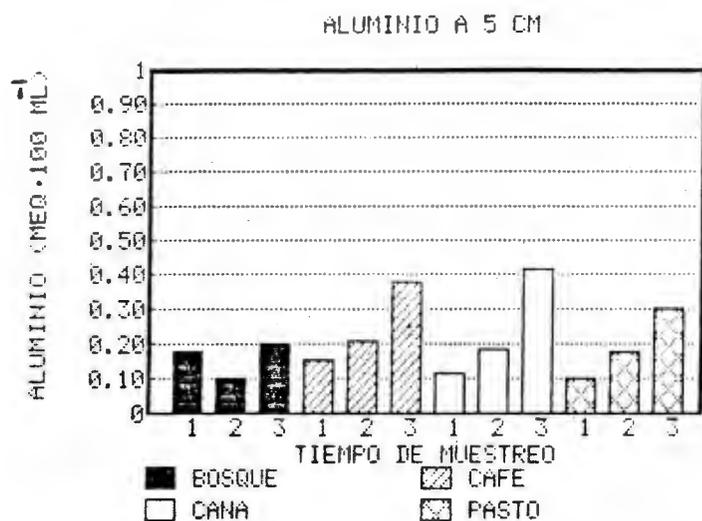


Figura 14. Aluminio intercambiable a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

4.2.3. Nitrógeno

El nitrógeno (N) es el nutrimento que más limita la productividad (SANCHEZ, 1976). Por esto, frecuentemente es aplicado en forma de fertilizante. Ya que la MO suministra más del 99% del N total (TATE, 1987), los niveles de N varían de acuerdo con las fluctuaciones en la MO. Las actividades que afectan la presencia de la MO en el suelo, como son la tala del bosque (MUELLER *et al*, 1985), la conversión de bosques tropicales a cultivos (JONES, 1973), la intensidad de labranza (JUO y LAL, 1979), o la práctica de fertilizar o incorporar el rastrojo al suelo (YOUNG, 1976), igualmente afectan los niveles de N.

Al igual que con la MO, el BQ tiene el nivel más alto de N, especialmente a 5cm (Fig. 15). El PS tiene el segundo nivel más alto a esta profundidad. En cambio, a 25cm, como ocurrió con la MO, el PS tiene el nivel más bajo de N. En cuanto a valores promedios de N, el BQ tiene el más alto, seguido por el CN y CF, y el PS con el valor más bajo.

El análisis del N se hizo solo en las muestras tomadas en febrero, por lo tanto no se pudo determinar su fluctuación con la época del año. De igual manera, tampoco son aparentes los efectos de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en junio y en octubre en el CF y CN. Ya para febrero, el N añadido no se evidencia, posiblemente debido a su lavado durante los meses de alta precipitación, o por su utilización por parte de los cultivos durante su crecimiento activo.

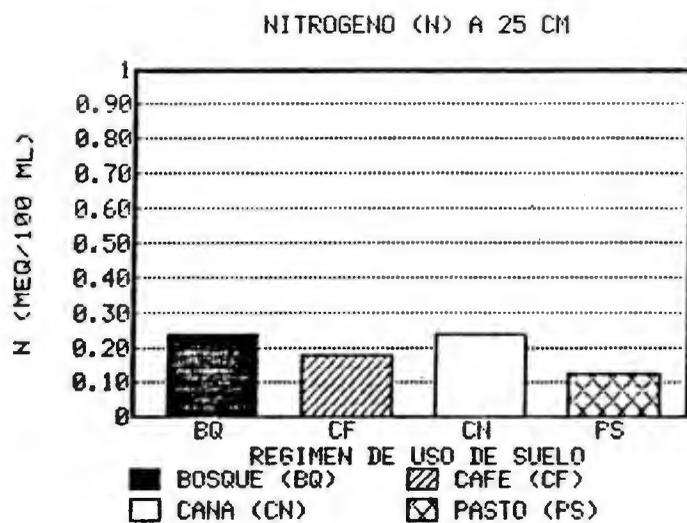
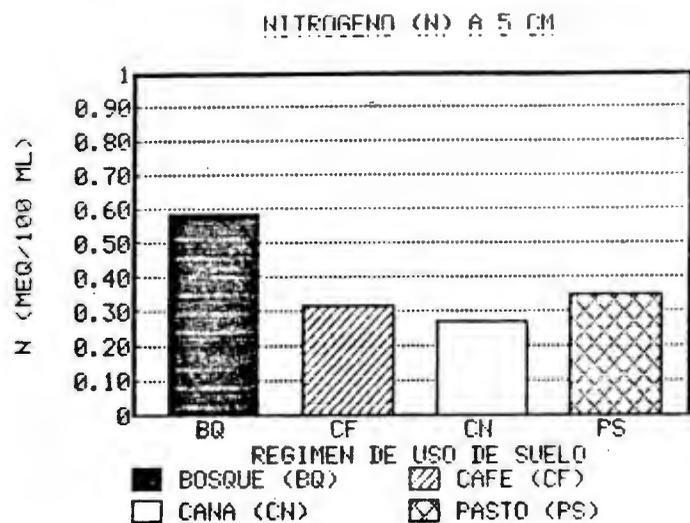


Figura 15. Nitrógeno total a dos profundidades, en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

4.2.4. Relación carbono:nitrógeno (C:N)

La relación C:N es de gran importancia para determinar la tasa de mineralización del N. Como el N analizado fue el N total, es de interés saber cuánto puede estar disponible. El N se hace disponible al mineralizarse y esto ocurre al descomponerse la MO. Los organismos descomponedores responden mejor a relaciones bajas de C:N, y ejecutan su función a mayor velocidad. Los valores altos de C:N resultan en una tasa de descomposición lenta, y consecuentemente en una baja disponibilidad de N (SANCHEZ, 1976). Una relación de C:N entre 10:1 y 12:1 representa el ámbito más favorable para la mineralización del N. Una relación por encima de este ámbito, representa una inmovilización del N (YOUNG, 1976).

En este trabajo, solo el BQ permanece dentro del ámbito favorable a ambas profundidades (Cuadro 4). El CN tiene un valor por encima de este ámbito a 5cm, pero su promedio de C:N se encuentra por dentro. El PS y el CF, ambos tienen valores altos de C:N a 25cm, lo cual se refleja en sus valores bajos de N a esta profundidad.

Aunque la alta relación de C:N en el CF implica una reducida tasa de mineralización del N, en la práctica esto puede tener una repercusión insignificante ya que el cafetal (al igual que el cañal) es fertilizado con fórmula múltiple en el transcurso del año. Aunque al potrero no se le aplica fertilizante, su baja tasa de mineralización de N

es contrarrestado en parte por el aporte del excremento del ganado.

4.2.5. Fósforo (P) y potasio (K)

Algunos investigadores han encontrado que al convertir un bosque a usos agrícolas, el P del suelo aumenta (SANCHEZ et al, 1982). Otros, en cambio, observaron que al acercarse al estado de bosque, los diferentes estados sucesionales presentan un aumento en el P (TOKY y RAMAKRISHNAN, 1983). En este trabajo, el P es menor en el BQ que en los demás suelos (Fig. 16). Esto puede deberse a que en el CF y CN se fertiliza con fórmula múltiple, y en el PS hay un aporte mediante el excremento del ganado. También puede influir el efecto fijador de la MO, aunque generalmente grandes cantidades de MO aumentan la provisión de P (THOMPSON y TROEH, 1982), o a que el bosque tenga mecanismos muy eficientes para la extracción del P del suelo (STARK y JORDAN, 1978; HERRERA et al, 1978), o a que la mayoría de los nutrimentos del sistema del bosque esté concentrada en la vegetación (NAS, 1975).

En todos los casos, el contenido de P disminuyó con la profundidad, de acuerdo con la disminución de la MO, ya que la MO contiene cantidades apreciables de P (LATHWELL y BOULDIN, 1981).

El tercer macronutriente de importancia es el potasio (K). La literatura difiere en cuanto a los efectos que tiene la conversión de bosques sobre el K del suelo. ALLEN (1985) encontró que al talar el bosque, el K intercambiable

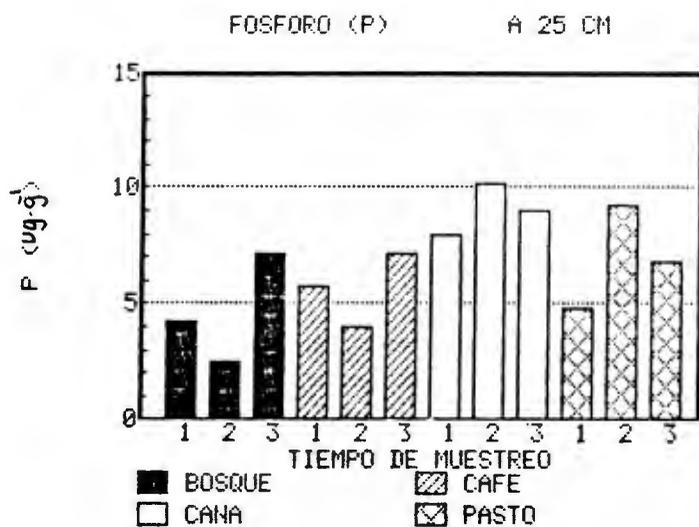
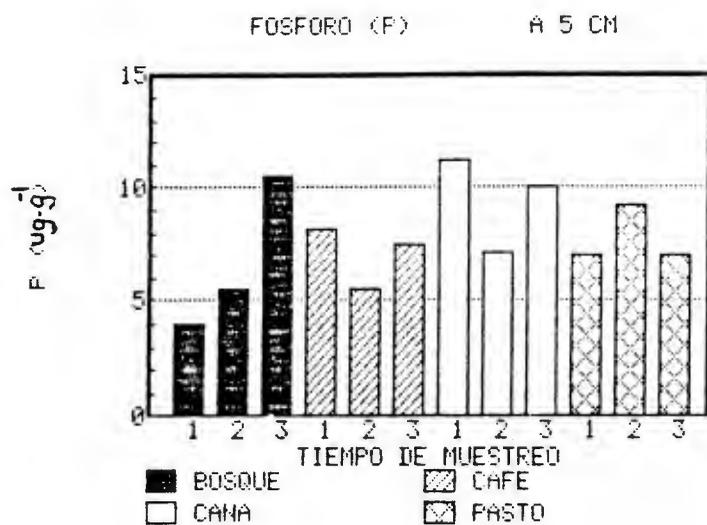


Figura 16. Fósforo disponible a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

no varió significativamente. AWETO (1981a), en cambio, encontró un aumento del K con la edad del barbecho. DE LAS SALAS y FOLSTER (1976) encontraron un aumento similar, aunque muy paulatino.

En los suelos de Costa Rica es poco frecuente que el K se encuentre por debajo de $0,20 \text{ meq} \cdot 100\text{ml}^{-1}$ (BERTSCH, 1986).

En los suelos estudiados solo el PS se aproxima a este valor (Fig. 17). De los dos suelos agrícolas, el CF tiene el valor significativamente más alto ($P < 0,05$). El BQ tiene un valor intermedio entre los suelos cultivados y el PS, aunque es significativamente mayor ($P < 0,01$) al del PS. Esta reducción de K en los suelos de pastos ya ha sido observada en trabajos previos (DE LAS SALAS y FOLSTER, 1976), aunque también se ha notado lo contrario (JUO y LAL, 1977). Es posible que el aumento de K en el CF y el CN se deba a la fertilización con formula múltiple que reciben estos suelos.

Al igual que el P, el K disminuyó con la profundidad.

Existe un aumento general de K en la muestra tomada en febrero. Al disminuir la precipitación el lavado de K también se ve reducido.

4.2.6. Calcio (Ca) y magnesio (Mg)

La mayoría de los trabajos coinciden en que la conversión de los bosques a usos agropecuarios reduce la concentración de nutrimentos del suelo (KANG y MOORMAN, 1977; AWETO, 1981a). En este trabajo se observaron valores significativamente más bajos ($P < 0,01$) de Ca en el CF y el CN que en el BQ. Sin embargo, el PS presenta un valor de Ca

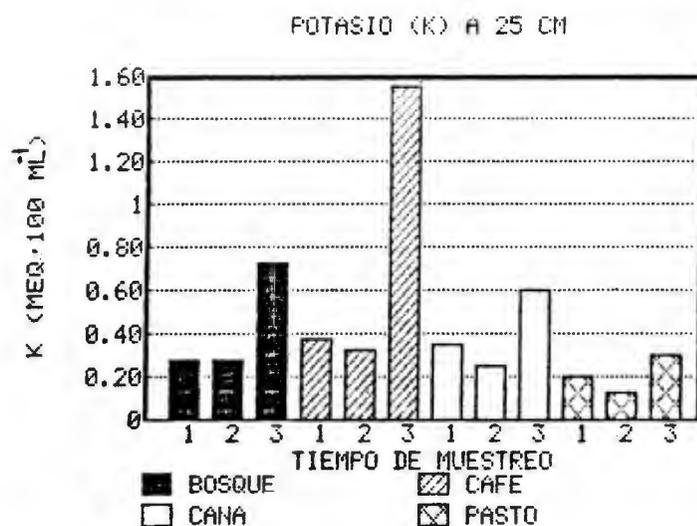
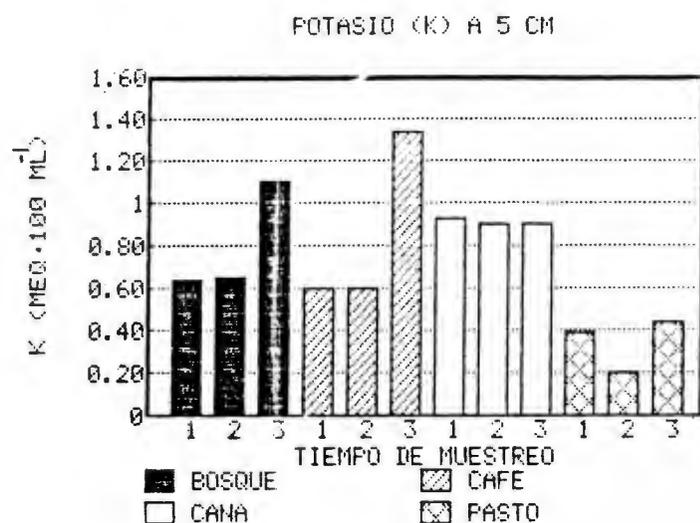


Figura 17. Potasio a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

ligeramente mayor ($P=0,14$) al del BQ (Fig. 18). Esta diferencia se debe principalmente al aumento sustancial ($P<0,01$) de Ca en el PS a 25cm, mientras que los demás suelos experimentan una disminución de Ca con la profundidad. La profundidad de penetración de raíces puede influir en el nivel de Ca, ya que este, al igual que otros nutrimentos, se agota principalmente en la zona de las raíces (THOMPSON y TROEH, 1982). La escasez de raíces a 25cm en el PS puede permitir que el Ca no se agote y tenga valores altos.

El magnesio (Mg) sigue un patrón casi idéntico al de Ca y probablemente por las mismas razones (Fig. 19). Todos los suelos menos el PS experimentan una disminución en el Mg con la profundidad. El PS, en cambio, tiene un aumento significativo ($P<0,01$). Los suelos cultivados tienen valores de Mg significativamente menores ($P<0,01$) a los suelos de bosque y de potrero. A pesar de que todos los suelos tienen valores de Mg por encima de $0,2 \text{ meq}\cdot 100\text{ml}^{-1}$, lo que puede considerarse como un valor crítico, desbalances entre Ca y Mg pueden provocar deficiencias de los nutrimentos (YOUNG, 1976).

4.2.7. Relaciones entre calcio, magnesio, y potasio

Además de las cantidades de los cationes mayores que son el Ca, K y Mg, que existan en un suelo, es importante determinar el equilibrio que exista entre ellos, ya que hay ámbitos fuera de los cuales el exceso o la falta de uno de

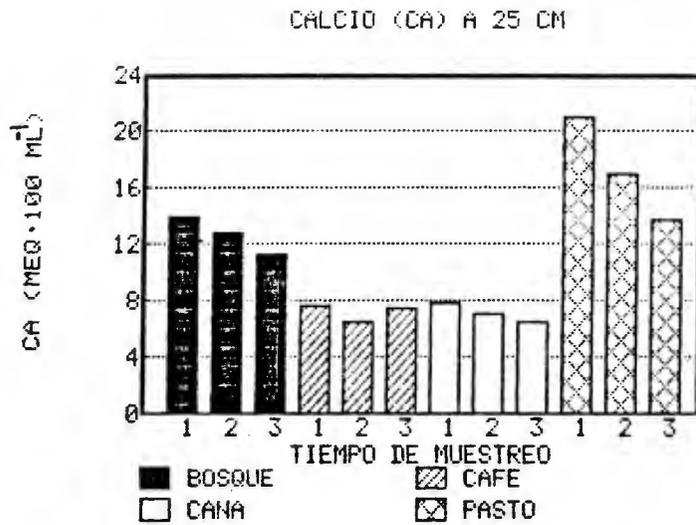
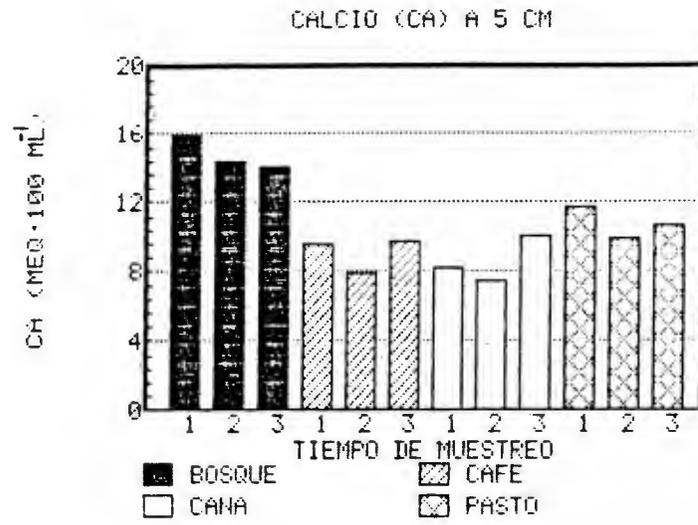


Figura 18. Calcio a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

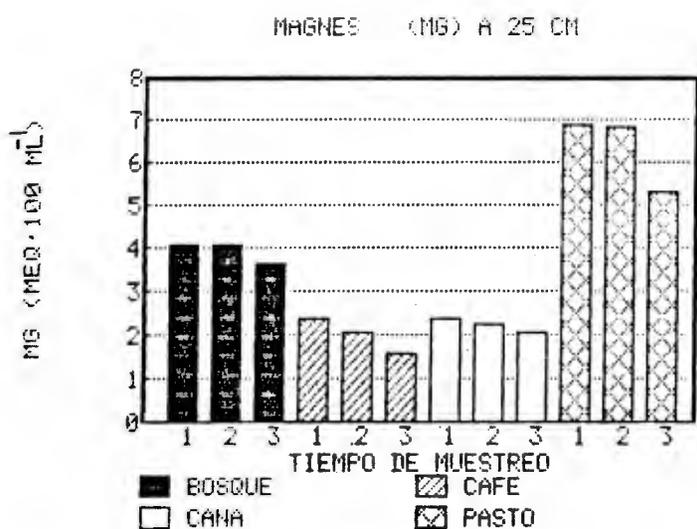
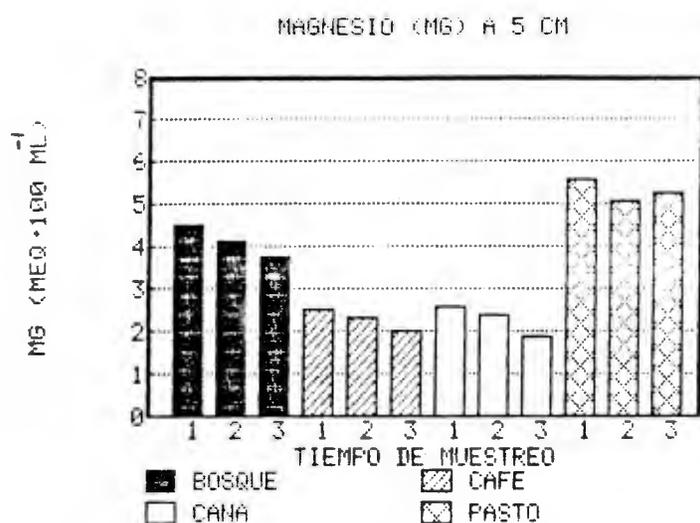


Figura 19. Magnesio a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

los cationes afecta la disponibilidad de los otros (BERTSCH, 1986).

Para la relación Ca/K el ámbito óptimo es entre 5 y 25. Solo el CF y el CN se ubican dentro de este ámbito con valores de 15,1 y 16,1 respectivamente (Fig. 20). El BQ tiene una relación alta con un valor de 35,0 lo cual indica un exceso de Ca sobre K. El PS presenta un valor de esta relación excesivamente alto de 79,0, lo cual puede provocar una condición de deficiencia de K.

Al comparar esta relación con respecto a la profundidad se nota que esta aumenta, especialmente en el PS ($P < 0,01$). Para el BQ, CF y CN, el aumento en esta relación se debe a una reducción diferencial en el que el K disminuye más que el Ca. Para el PS, en cambio, el aumento se debe no solo a una reducción de K, sino a un aumento en el Ca con respecto a la profundidad.

Con respecto a la relación Ca/Mg, todos los suelos se ubican entre 2 y 5, el ámbito considerado óptimo (BERTSCH, 1986) (Fig. 21). Sin embargo, a 5cm el PS se aproxima a un leve exceso de Mg sobre Ca.

En cuanto a la relación Mg/K, que tiene un ámbito de balance entre 2,5 y 15, solo el PS presenta un desbalance con una deficiencia de K con respecto a Mg (Fig. 22). En todos los suelos hay un aumento en la relación Mg/K con respecto a la profundidad. Para el BQ, CF y CN, esto se debe a una reducción diferencial en que el K disminuye más que el Mg. En cambio, para el PS, al igual como sucedió con

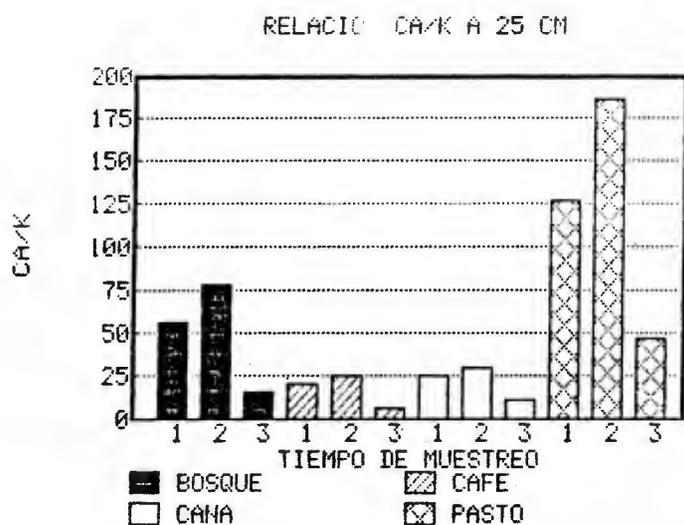
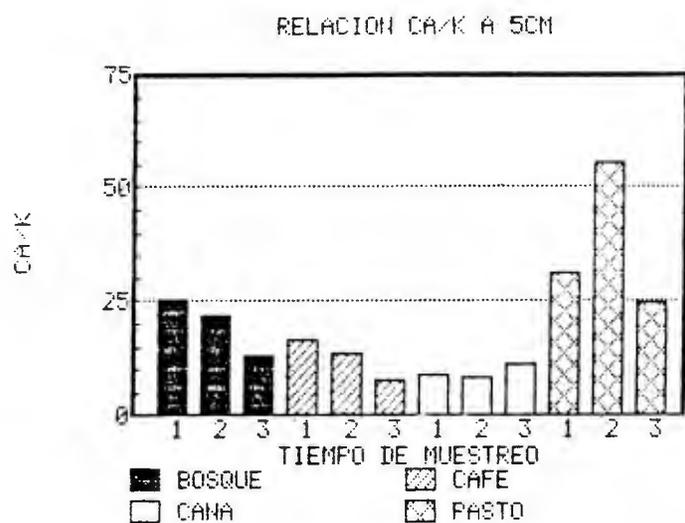


Figura 20. Relación calcio/potasio a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

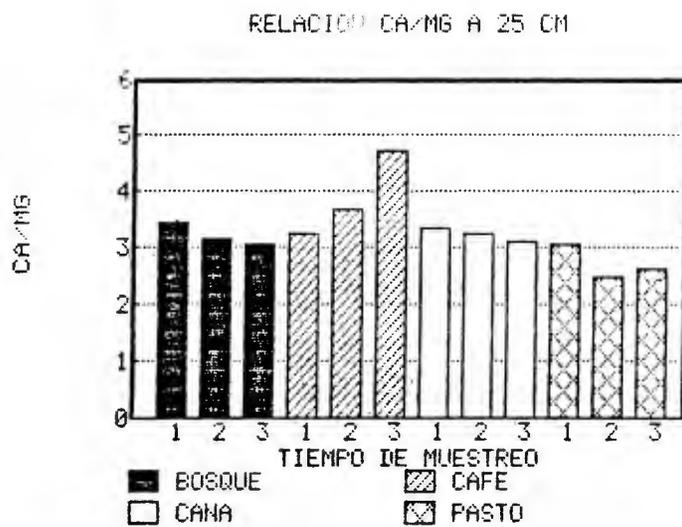
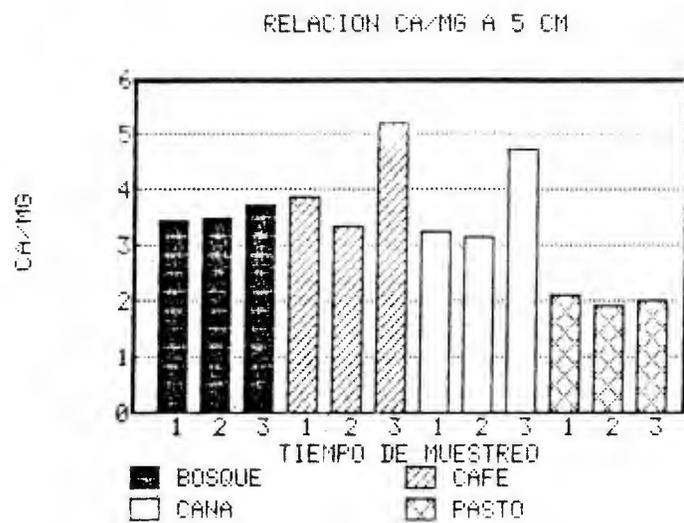


Figura 21. Relación calcio/magnesio a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

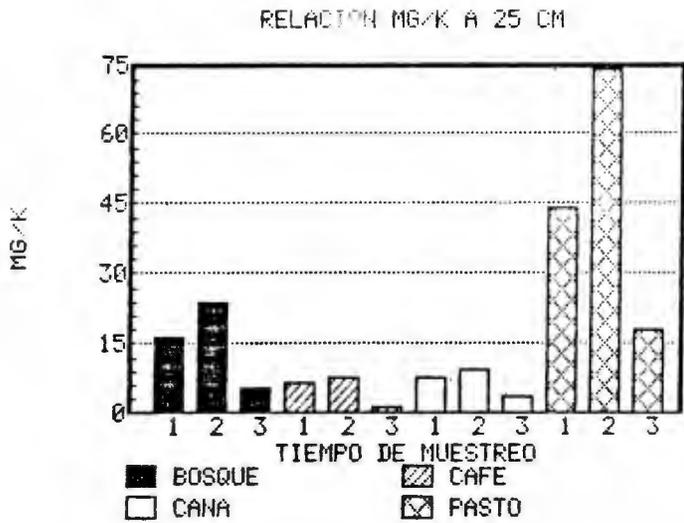
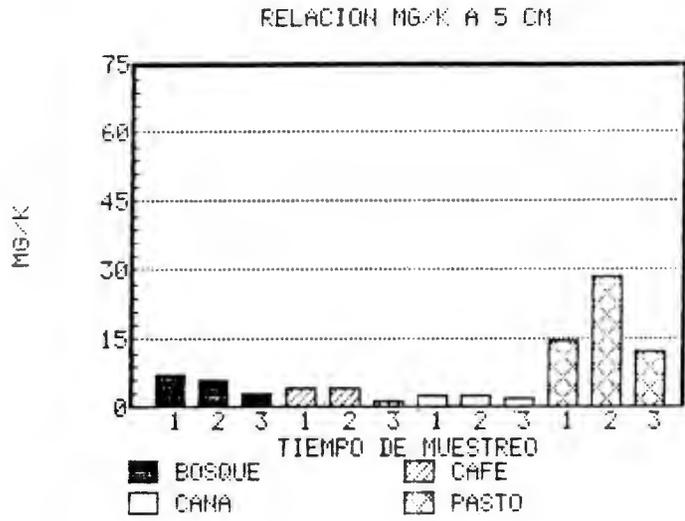


Figura 22. Relación magnesio/potasio a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

la relación Ca/K, el aumento de esta relación se debe no solo a una disminución de K sino a un aumento en el Mg. A 25cm, con un valor de 15,2 para la relación Mg/K, el BQ sufre de una leve deficiencia de K.

Como resumen del balance de los cationes de intercambio, se puede decir que todos los suelos presentan un balance adecuado entre Ca y Mg. El CF y el CN, además, presentan un balance adecuado con respecto a K. El BQ también presenta un balance adecuado entre K, Ca y Mg pero solo a 5cm. A 25cm la disminución significativa de K provoca un desbalance en las relaciones Ca/K y Mg/K. En el PS estas dos relaciones se encuentran en un alto grado de desbalance en ambas profundidades. Esto es debido no solo a los muy bajos valores de K, sino a los valores altos de Ca y Mg.

Con respecto a los macronutrientes, es importante anotar que aquí solo se ha estudiado el contenido en el suelo, y no en la biomasa aérea o subterránea. Sin duda, en este aspecto el bosque supera a todas las demás coberturas, por lo tanto una buena cantidad de los nutrientes en el bosque se encuentra no en el suelo, sino en las raíces y vástagos de los árboles (NAS, 1982).

4.2.8. Capacidad de intercambio de cationes efectiva

El dato más directo para medir el potencial nutricional de un suelo es la CICE (capacidad de intercambio catiónico efectiva) (BERTSCH, 1986). En trabajos previos se ha encontrado un descenso general de la CICE al convertir el

bosque a otros usos (ALLEN, 1985; AWETO, 1981). Sin embargo JUO y LAL (1977) encontraron un aumento en la CICE bajo una cobertura de pasto de Guinea (Panicum maximum).

En este trabajo, el PS presentó el mayor valor ($P < 0,01$) de la CICE, pero hay que recordar que el PS también tuvo el mayor desbalance entre cationes, lo cual la CICE no toma en cuenta. Después del PS, el BQ tuvo el valor más alto ($P < 0,01$) (Fig.23). El CF y el CN tuvieron los valores más bajos, pero sin diferencias significativa entre sí ($P = 0,16$).

Ya que los componentes principales de la CICE son el Ca, el K y el Mg, el patrón que sigue la CICE depende del patrón de estos cationes. Todos los suelos, menos el PS, presentan una disminución de la CICE al ir de 5cm a 25cm. En el PS, la CICE aumenta significativamente ($P < 0,01$) debido al aumento que tiene de Ca y Mg. En el BQ la CICE baja significativamente ($P < 0,01$), y también en el CF ($P < 0,05$). En el CN la disminución de la CICE con la profundidad no es estadísticamente significativa ($P = 0,06$).

4.2.9. Saturación de acidez

Para interpretar los valores de CICE con más detalle, es necesario, además de determinar las relaciones entre cationes, conocer el porcentaje de CICE compuesto por el Al intercambiable, o el porcentaje de saturación de acidez. En los suelos de Costa Rica generalmente la acidez no presenta un problema (BERTSCH, 1986).

Los suelos estudiados se ubican bien por debajo del nivel crítico de 10% de saturación de acidez (Fig. 24). El

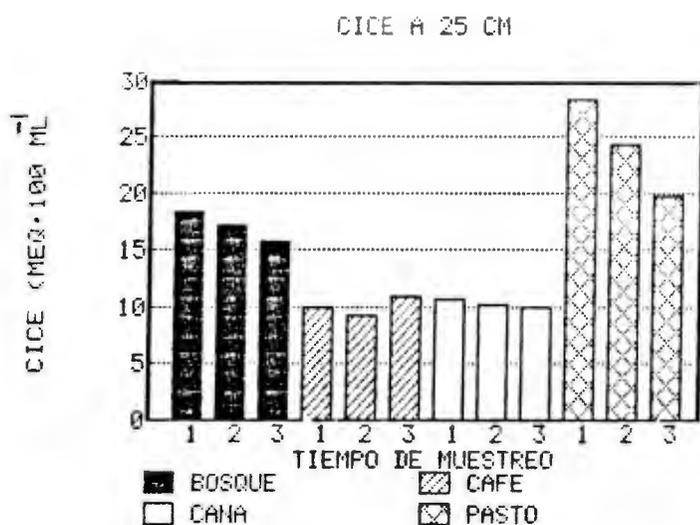
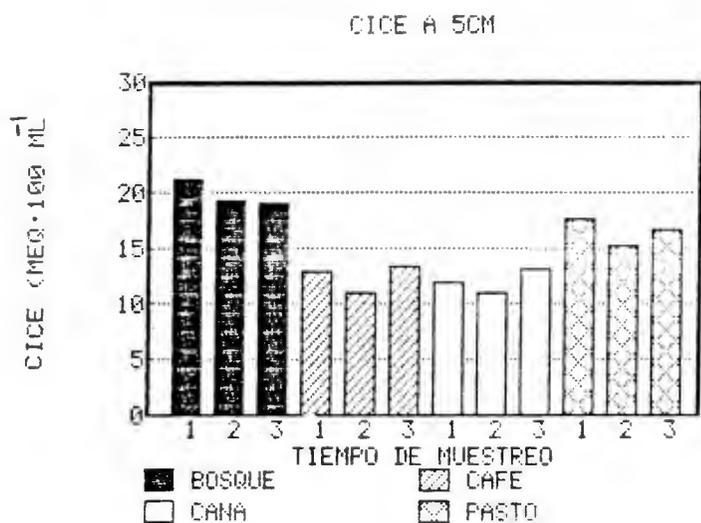


Figura 23. Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), de suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

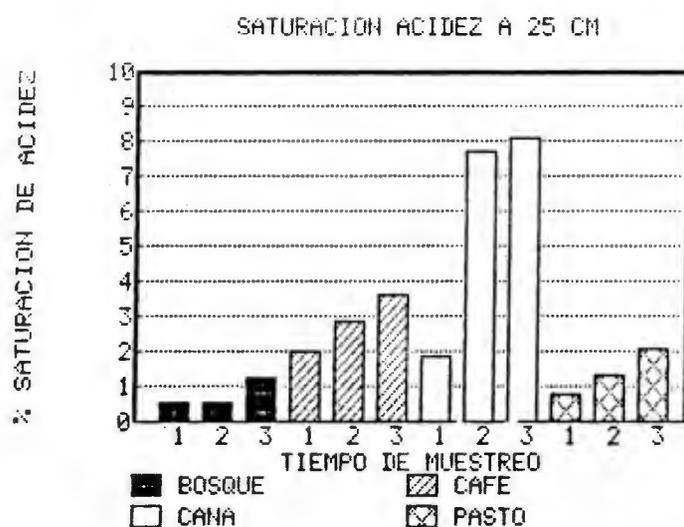
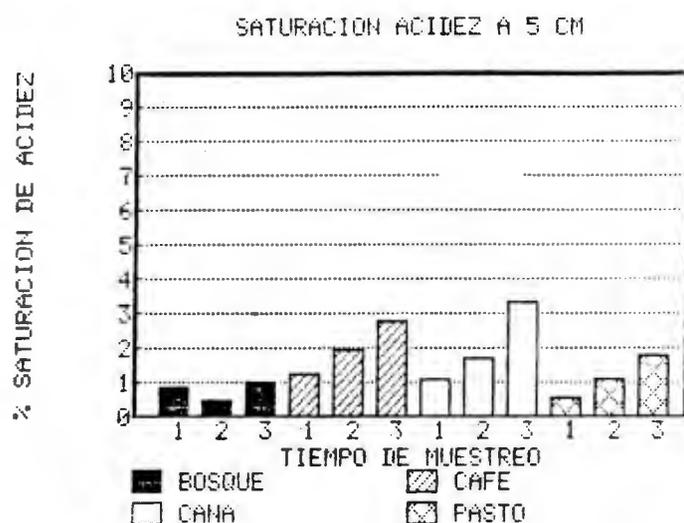


Figura 24. Saturación de acidez a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

CF y el CN, que tuvieron los valores más bajos de pH, consecuentemente presentan los mayores porcentajes de saturación de acidez, ya que a menor pH, es más disponible el aluminio. De nuevo, esto puede deberse al uso prolongado de fertilizantes nitrogenados. El BQ y el PS tuvieron los porcentajes más bajos de saturación de acidez.

4.2.10. Manganeso (Mn), cinc (Zn), cobre (Cu) y hierro (Fe)

Finalmente, al estudiar el potencial nutricional de un suelo, hay que tomar en cuenta los micronutrientes Mn, Zn, Cu y Fe. Estos elementos son esenciales, pero en cantidades muy pequeñas, ya que la sobreabundancia de estos, puede ser tóxica para las plantas. La cantidad ideal de Mn es entre $5-50 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$, aunque esto depende no solo del cultivo, sino de las condiciones del suelo (SANCHEZ, 1976). Solo el BQ presenta un valor deficiente de $4,0 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$ (Fig. 25). Los demás suelos tienen valores adecuados. Para estos tres el Mn disminuye con la profundidad. En cambio, en el BQ, el Mn aumenta. Esto puede deberse a la mayor cantidad de MO en la superficie con la capacidad de formar complejos con el Mn, y reducir su disponibilidad.

El ámbito óptimo general de Zn es entre 2 ug g^{-1} y 15 ug g^{-1} (JONES y ECK, 1973; HUMBERT, 1973). Todos los suelos estudiados se ubican dentro de este ámbito óptimo, aunque el CF tiene un valor significativamente mayor ($P < 0,05$) a los otros (Fig. 26). El Zn tiende a disminuir a mayor profundidad. Solo en el CN aumenta, aunque no significativamente ($P = 0,12$). Hay que anotar aquí que en

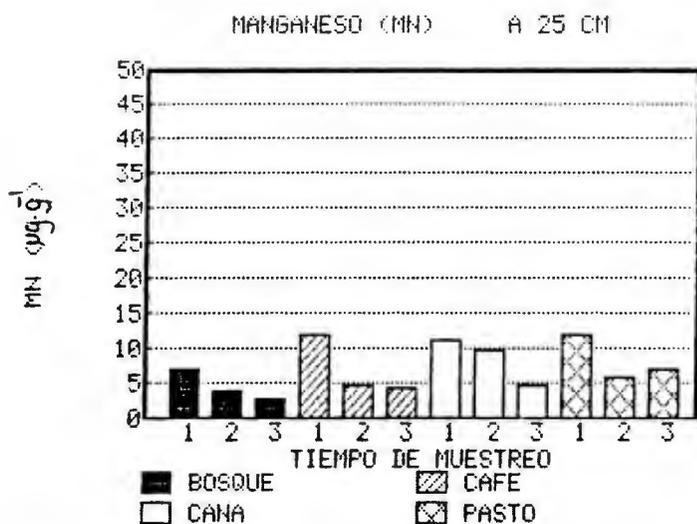
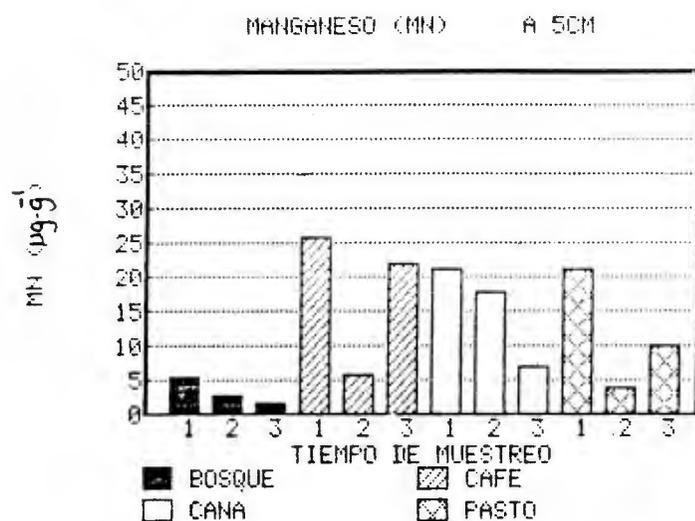


Figura 25. Manganeso a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

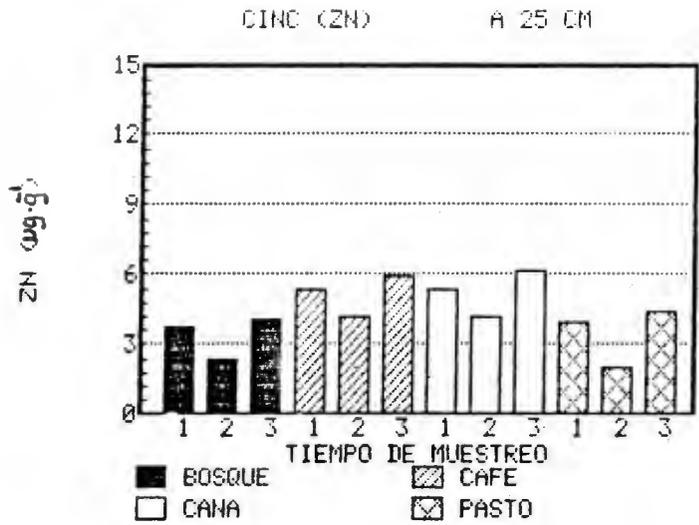
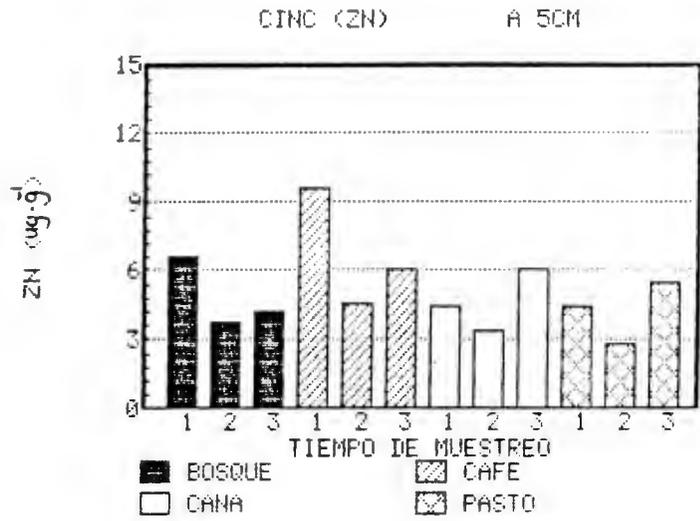


Figura 26. Cinc (Zn) a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

general los valores de los micronutrientes determinados en el laboratorio, con la solución Olsen, a pesar de ser los más confiables, no siempre son muy representativos, en particular con el Zn (BERTSCH, 1986).

Un factor que puede afectar significativamente los valores de los micronutrientes es la aplicación de plaguicidas (HARTSHORN, 1982). Este puede ser el factor responsable de los valores de Cu mayores en los suelos cultivados, especialmente en el CF, ya que el uso de fungicidas con cobre es generalizado para combatir la roya (Hemileia vastarix). En los suelos cultivados, también puede influir su mayor acidez, la cual aumenta la disponibilidad del Cu. El PS presenta el valor más bajo, aunque todavía dentro del ámbito óptimo de $3-29 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$ (BERTSCH, 1986) (Fig. 27).

El último micronutriente que se analizó fue el Fe (Fig. 28). Este presentó valores excesivos al ámbito óptimo de $10-50 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$ (BERTSCH, 1986) en todos los suelos, menos en el BQ. Además de la posible presencia de óxidos de hierro del material matriz del suelo, los valores altos en el CF y CN pueden deberse al uso de plaguicidas, o a sus valores de pH más bajos. Los valores bajos de Fe en el BQ, pueden deberse a la capacidad que tiene la MO de formar complejos con este micronutriente.

4.2.11. Conclusiones

En resumen, se puede afirmar que con respecto a las propiedades químicas del suelo, el BQ, por lo general, tiene

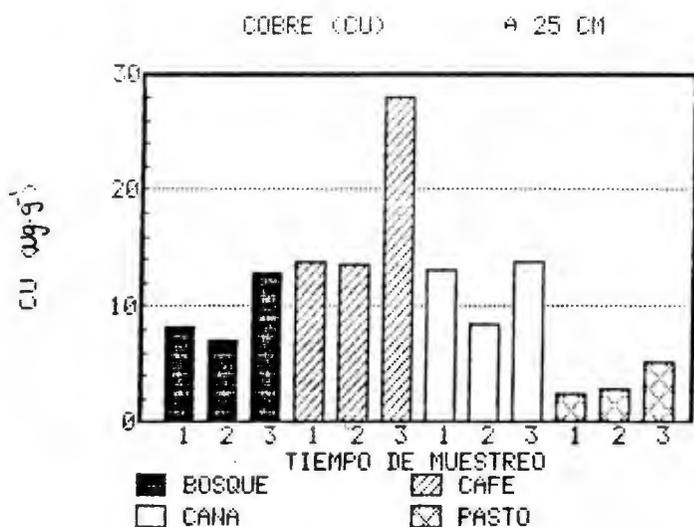
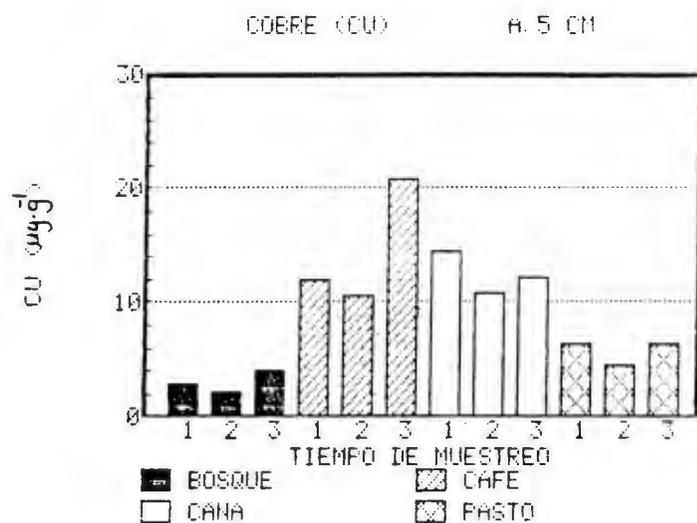


Figura 27. Cobre a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

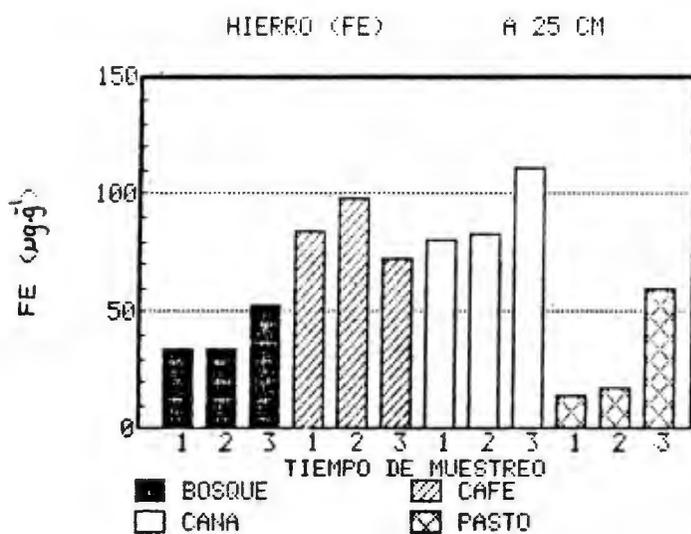
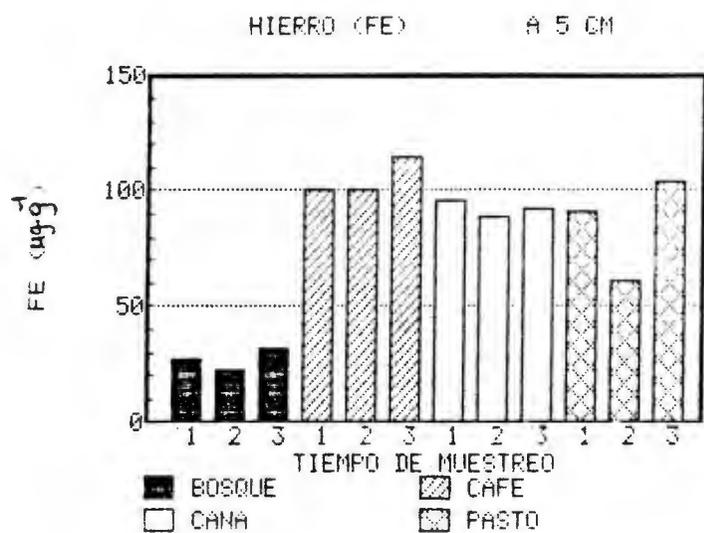


Figura 28. Hierro (Fe) a dos profundidades, en tres épocas (1=agosto, 2=noviembre, 3=febrero), en suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos

los valores más adecuados (Cuadro 5). Tiene el pH más alto, el menor Al intercambiable y consecuentemente el menor porcentaje de saturación de acidez. Estas condiciones aseguran una pérdida mínima de nutrientes por el lavado. El BQ tiene el nivel más alto de MO y el valor más bajo de la relación C:N, lo cual representa un potencial de una descomposición rápida de la MO. Estos dos factores aseguran un continuo suministro bastante proporcionado de nutrientes provenientes de la MO. Con respecto a los macronutrientes, el N fue más abundante en el BQ. El BQ, sin embargo, tuvo el valor más bajo de P, posiblemente por carecer de las adiciones de este elemento como ocurre en los otros suelos, mediante la fertilización química en el CF y CN, y mediante el excremento vacuno en el PS. La gran cantidad de MO en el BQ puede reducir el P disponible al fijarlo, aunque también puede ser que una gran cantidad del P esté inmovilizada en la biomasa. El K presentó un valor intermedio en el BQ, aunque ligeramente bajo en relación con el Ca y el Mg que presentaron valores altos en el BQ. El valor de la CICE, segundo solo al PS, fue más alto en el BQ. Además, no presentó mayores desbalances en los cationes como ocurrió en el PS. Finalmente, la MO, que proporciona un gran número de beneficios, también tiene la capacidad de fijar algunos nutrientes esenciales, lo cual puede haber ocurrido con el Mn. Los demás micronutrientes en el BQ se observaron dentro de los ámbitos óptimos.

Las condiciones químicas en el PS generalmente contrastaron con las del BQ y el CF y CN. Tuvo un pH adecuado aunque menor que el de BQ. Con respecto al Al intercambiable y el porcentaje de saturación de acidez, el PS presentó valores intermedios entre el BQ y los otros suelos. El PS tuvo los valores más altos de Ca y Mg, pero a tal punto que provocaron desbalances y deficiencias en el K. La CICE del PS fue la más alta, aunque este valor alto estuvo presente, en parte, a costa de un desbalanceado valor elevado de Ca y Mg. Con respecto a los micronutrientes, el PS tuvo valores intermedios de Mn y Fe, y valores bajos de Zn y Cu.

El CF y el CN siguen siendo semejantes tanto en los factores químicos como en los físicos. Ambos tienen un pH bajo y un valor de Al intercambiable mayor a los demás, lo cual provoca también un mayor porcentaje de saturación de acidez. Tienen niveles intermedios de MO y por consiguiente, niveles intermedios de N y P. Específicamente el CN tiene el valor más alto de P, aunque todavía a un nivel deficiente, y el CF tiene el valor más alto de K. El CF y el CN tienen los niveles menores de Ca y Mg, aunque siempre dentro del ámbito considerado óptimo, y sin resultar en ningún desbalance entre los cationes, por lo cual su CICE, aunque baja, posiblemente sea de más valor que la CICE alta del PS que presenta un desbalance. En general el CF y el CN tienen valores altos de los micronutrientes, con el Fe como el único que muestra niveles excesivos.

Las diferencias en las propiedades químicas no son tan uniformes como lo fueron en las propiedades físicas. No obstante, en su gran mayoría los cambios provocados por la conversión del bosque a otros usos, resulta en un detrimento de estas propiedades químicas.

Cuadro 5. Diferencias significativas en las propiedades químicas, entre suelos bajo cobertura de bosque, café, caña de azúcar, y pastos, en Pico Blanco de Escazú

| Propiedad | Suelos | | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | BQ | CF | CN | PS |
| MO (%) | 7,6a | 5,5b | 5,1b | 4,9b |
| pH | BQ 6,1a | PS 5,8b | CN 5,4c | CF 5,3d |
| Al (meq·100ml ⁻¹) | BQ 0,15a | PS 0,25b | CF 0,27b | CN 0,39c |
| N # (meq·100ml ⁻¹) | BQ 0,42 | CN 0,26 | CF 0,25 | PS 0,24 |
| C:N # | BQ 10,7 | CN 11,6 | PS 12,4 | CF 13,3 |
| P (ug·g ⁻¹) | CN 9,3a | PS 7,3b | CF 6,4bc | BQ 5,7c |
| K (meq·100ml ⁻¹) | CF 0,80a | CN 0,66b | BQ 0,62b | PS 0,28c |
| Ca (meq·100ml ⁻¹) | PS 14,1a | BQ 13,8a | CF 8,2b | CN 7,9b |
| Mg (meq·100ml ⁻¹) | PS 5,8a | BQ 4,1b | CN 2,3c | CF 2,2c |
| Ca/K | PS 79,0a | BQ 35,0b | CN 16,1c | CF 15,1c |
| Ca/Mg | CF 4,0a | CN 3,5b | BQ 3,4b | PS 2,4c |
| Mg/K | PS 32,0a | BQ 10,5b | CF 5,6b | CN 4,7b |

(continua)

| | | | | |
|------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| CICE (meq·100ml ⁻¹) | PS 20,4a | BQ 18,6b | CF 11,3c | CN 11,2 c |
| Sat.Acidez (%) | BQ 0,82a | PS 1,28ab | CF 2,45b | CN 3,98c |
| Mn (ug·g ⁻¹) | CF 12,5a | CN 12,2a | PS 10,2a | BQ 4,0b |
| Zn (ug·g ⁻¹) | CF 6,0a | CN 4,9b | BQ 4,2b | PS 3,9b |
| Cu (ug·g ⁻¹) | CF 16,4a | CN 12,2b | BQ 6,4c | PS 4,7d |
| Fe (ug·g ⁻¹) | CF 95,0a | CN 92,2a | PS 58,8b | BQ 33,9c |

Suelos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí; BQ=bosque; CF=café; CN=caña de azúcar; PS=pastos

no hay información para calcular diferencias significativas

4.3. Propiedades biológicas

4.3.1. Descomposición de materia orgánica

Un factor muy importante, con respecto a la materia orgánica (MO), en cuanto a su influencia sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, es su tasa de descomposición. Con los valores de la relación C:N se obtuvo un indicio del potencial de descomposición de la MO en cada suelo. Con la prueba de invernadero de descomposición, se intentó obtener los valores reales de la tasa de descomposición. Los resultados, sin embargo, fueron poco confiables, debido principalmente a la pobre metodología. Como la descomposición de la MO depende de la comunidad de descomponedores, de la calidad de la MO, y del

ambiente físico-químico (ANDERSON y SWIFT, 1983), al homogenizar varios de estos factores como el sustrato orgánico y el ambiente físico, las curvas resultantes también fueron muy parecidas (Fig. 29). En las primeras 5 semanas la descomposición llegó a 50%, y en 10 semanas llegó a casi 60%. Desafortunadamente, no se pudo descubrir la diferencia en la descomposición de la MO entre los suelos bajo las diferentes coberturas vegetales. Para un trabajo futuro se sugiere hacer el análisis de la descomposición de MO in situ, y con una mezcla de mantillo de diferentes especies.

4.3.2. Prueba de fertilidad en invernadero

Los valores obtenidos en los análisis de suelos son números empíricos que adquieren mayor valor al poder compararlos con las respuestas en el crecimiento de las plantas. Por esta razón se hizo la prueba de invernadero de fertilidad (Cuadro 6).

Al comparar las curvas de crecimiento de maíz en los diferentes suelos, se observó que el maíz en el BQ alcanzó la mayor altura, seguido respectivamente por el maíz en el PS, el CF y el CN. Sin embargo, al comparar el peso seco de las plantas, el maíz en el BQ mantuvo el valor más alto ($P < 0,01$), pero el maíz en el PS tuvo el valor más bajo, tanto con respecto al peso de raíz, como al peso de vástago (Fig. 30).

Como indicador del vigor, se calculó la relación de peso total/altura final. De nuevo, entre todos, el maíz en

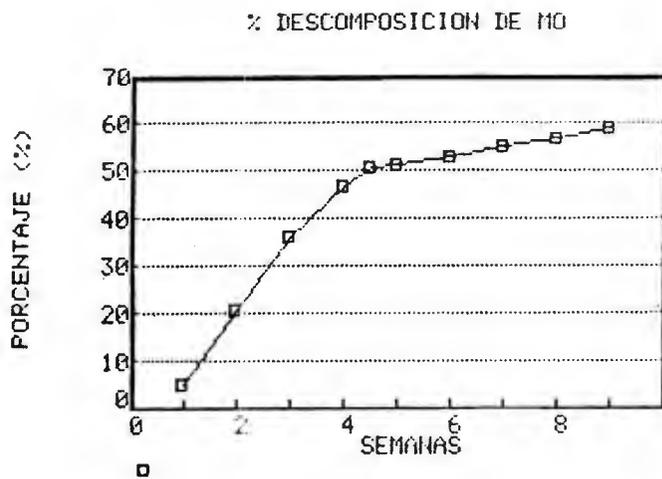


Figura 29. Curva promedio de la descomposición de la materia orgánica en los suelos bajo cobertura de bosque, café, caña y pastos

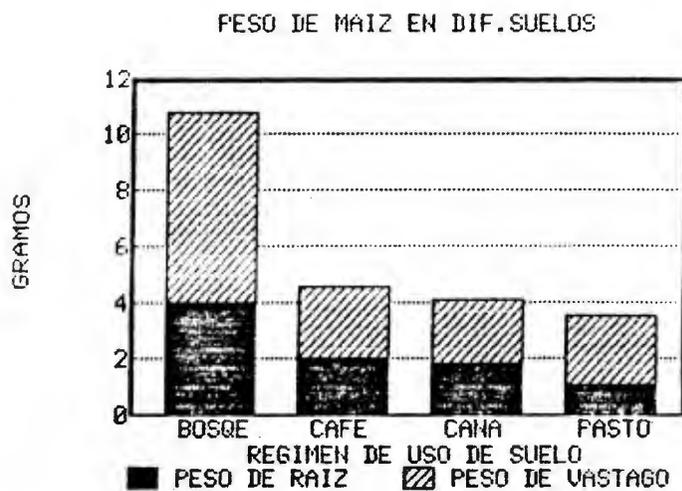
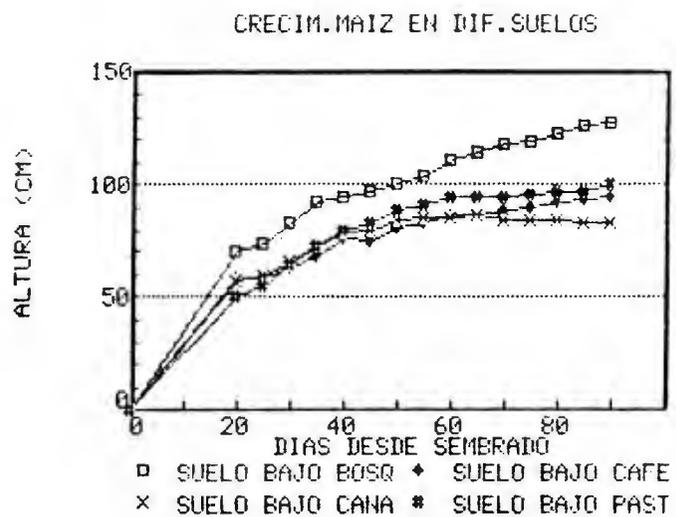


Figura 30. Crecimiento y peso seco final de maíz en suelos de bosque, de cafetal, de cañal y de potrero

Cuadro 6. Crecimiento de maíz en suelos provenientes de un bosque, un cafetal, un cañal, y un potrero.

| Factor | Suelo | | | |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Altura final (cm) | BQ 127,3a | PS 100,4b | CF 94,9b | CN 83,5c |
| Peso seco total (g) | BQ 10,85a | CF 4,67b | CN 4,15b | PS 3,56b |
| Peso de vástago (g) | BQ 6,80a | CF 2,57b | PS 2,51b | CN 2,34b |
| Peso de raíz (g) | BQ 4,05a | CF 2,09b | CN 1,82b | PS 1,05b |
| Peso total/altura | BQ 0,085a | CN 0,050b | CF 0,049b | PS 0,035c |
| # Peso vástago/ peso raíz | PS 2,39 | BQ 1,68 | CN 1,29 | CF 1,23 |

Suelos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

no hay datos para diferencias significativas

el BQ presentó un valor significativamente mayor ($P < 0,01$), y el maíz en el PS presentó un valor significativamente más bajo ($P < 0,05$).

Al comparar la relación de peso de vástago/peso de raíz, se observó que el maíz en el PS dedicó relativamente menos biomasa a las raíces, que las plantas en los demás suelos (Fig. 31).

Esta prueba confirma las conclusiones previas de que las condiciones físico-químicas en el BQ son las más favorables, mientras que las del PS, presentan el mayor deterioro. Las condiciones físico-químicas del CF y el CN son similares entre sí, e intermedias entre las del BQ y las del PS.

Una limitación de esta prueba es que la respuesta del maíz pudiera deberse a un solo factor limitante, lo cual no reflejaría el estado general de los suelos. Sin embargo, al tener el conjunto de datos para las propiedades físicas y químicas de los suelos, esta prueba de invernadero resulta válida.

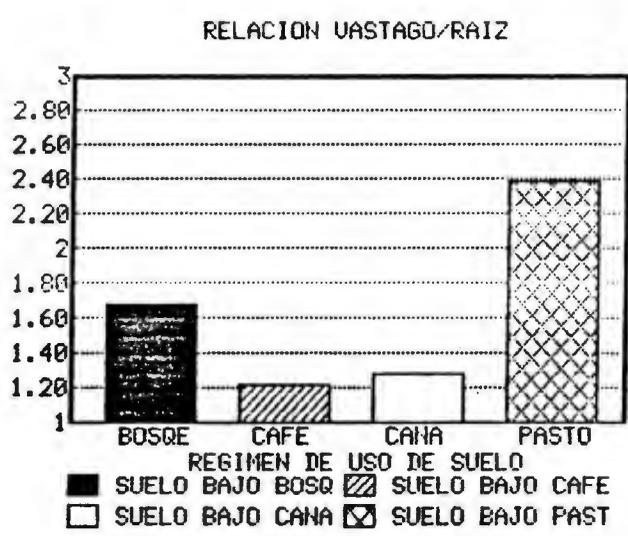
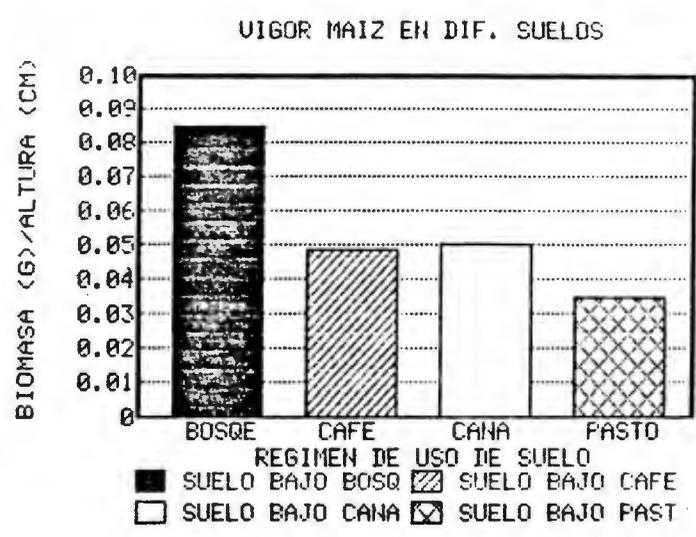


Figura 31. Relación de peso/altura (Vigor), y de peso de vástago/peso de raíz de maíz en suelos de bosque, de cafetal, de cañal y de potrero

5. CONCLUSIONES

Con base en los estudios realizados, se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los suelos bajo las diferentes coberturas (de bosque, de café, de caña de azúcar, y de pastos), presentaron texturas en el ámbito franco. La diferencia entre profundidades en el suelo de bosque se debió principalmente a la capa de materia orgánica que se presenta en la superficie.
2. La estructura del suelo, calculada con base en la densidad aparente y la porosidad, fue significativamente ($P < 0,01$) mejor en el suelo forestal. Y en el suelo de pastos fue significativamente ($P < 0,05$) menos favorable debido probablemente a la compactación causada por el pisoteo del ganado.
3. La capacidad de retención de agua fue significativamente ($P < 0,01$) mayor en el suelo forestal que en los demás suelos, con los valores más bajos en el suelo de pastos. En cuanto a la cantidad de agua útil, de nuevo el suelo del bosque tuvo el nivel estadísticamente ($P < 0,01$) más alto, seguido por los de café, pastos y caña de azúcar. En este último se registra el nivel más bajo.
4. La máxima conductividad hidráulica se presentó en el suelo forestal, seguido por el de caña y café, con valores significativamente ($P < 0,01$) menores. El suelo de pastos

tuvo el valor significativamente ($P < 0,05$) más bajo. Esta baja conductividad hidráulica puede aumentar los riesgos de la erosión.

5. El contenido de materia orgánica fue significativamente ($P < 0,01$) más alto en el suelo de bosque. Por otra parte, el suelo con pasto a 25cm presentó un valor estadísticamente ($P < 0,05$) menor al de los otros suelos. Esto se debe probablemente a su menor profundidad.

6. En cuanto a la acidez del suelo, el pH fue mayor en el suelo de bosque, y menor en los suelos cultivados de caña de azúcar y de café, posiblemente debido a un abonamiento por varios años con fertilizantes químicos nitrogenados. El aluminio intercambiable fue más alto en el cañal, seguido respectivamente por los suelos de cafetal y de pastos. El suelo de bosque tuvo un valor significativamente ($P < 0,05$) menor. De igual manera, el porcentaje de saturación de acidez fue mayor en el cañal, seguido respectivamente por los suelos del cafetal, el potrero y el bosque.

7. El nitrógeno siguió el patrón de la materia orgánica, con los niveles más altos en el bosque, y los niveles más bajos en el potrero. En cambio, el fósforo mostró valores máximos en el cañal, y mínimos en el bosque.

8. El suelo del potrero mostró los niveles más altos de los cationes de intercambio, de calcio y de magnesio, seguido por el bosque. Estos fueron mucho menor en el

cafetal y el cañal, por otra parte, el potrero registró el nivel más bajo de K, seguido por el bosque, el cañal, y el cafetal, respectivamente. La abundancia de calcio y magnesio en relación con el potasio en el potrero puede ser condición ante una deficiencia de potasio.

9. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) fue mayor en el potrero, seguida por el bosque que fue mayor que en el cafetal y el cañal.

10. Los micronutrientes presentaron los niveles más altos en los suelos cultivados de café y caña de azúcar. Esto posiblemente sea un efecto del uso de plaguicidas en estos suelos.

11. El maíz presentó un mayor y mejor crecimiento en el suelo de bosque, que en los demás suelos. Con respecto al peso de vástago, peso de raíz, y vigor, el maíz en el suelo de potrero presentó los valores más bajos.

6. LITERATURA CITADA

- ADEOYE, K.B. 1986. Physical changes induced by rainfall in the surface layer of an alfisol, Northern Nigeria. Geoderma 39(1):59-66.
- ALBERTS, E.E. y WENDT, R.C. 1985. Influence of soybean and corn cropping on soil aggregate size and stability. SoilSci.Soc.Am.J. 49:1534-1537.
- ALLEN, Julia C. 1985. Soil response to forest clearing in the United States and the Tropics: Geological and biological factors. Biotropica 17(1):15-27.
- ANDERSON, J.M. y SWIFT, M.J. 1983. Decomposition in Tropical Forests. In SUTTON, T.C. et al. (eds) Tropical Rainforest: Ecology and Management. Blackwell Scientific Publications. pp. 287-309.
- ARNOLD, J.E.M. y JONGAMA, J. 1976. Fuelwood and charcoal in developing countries. Unasylva 29:2-9.
- ARSCOTT, T.G. 1978. A program for natural resources conservation and utilization in the areas of soil conservation and classification. USAID.
- ASHTON, P.S. 1977. A contribution of Rainforest Research to Evolutionary Theory. Ann.MissouriBot.Garden 64:694-705.
- AWETO, A.O. 1981a. Secondary succession and soil fertility restoration in South Western Nigeria. II: Soil fertility Restoration. J.Ecol. 69:609-614.
- AWETO, A.O. 1981b. Secondary succession and soil fertility restoration in South Western Nigeria. III: Soil and vegetation interrelationships. J.Ecol. 69:957-963.
- BARTHOLOMEW, W.V. 1975. El Nitrógeno y la materia orgánica de los suelos. En NAS (National Academy of Sciences). 1975. Suelos de las regiones tropicales húmedas. Buenos Aires. Ediciones Marymar. pp. 85-108.
- BERTSCH, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Programa de Comunicación Agrícola de la Universidad de Costa Rica. 88p.
- BID (Banco Internacional de Desarrollo), 1977. Informe General Sobre el Desarrollo Agropecuario y Rural de Costa Rica. División de Estudios Generales, Dept. de Desarrollo Económico y Social. (Octubre de 1977). p. 84.

- BLAKE, C.F. 1965. Bulk Density. In BLACK, C.A. (ed). Methods of Soil Analysis. A.S.A. Agronomy Monograph #9. Part 1. p.374-377.
- BLUSTEIN, H.I. et al. 1970. Area Handbook for Costa Rica. Wash. D.C. American University. Citado en BOUCHER, D.H. et al 1983. Coffee. En JANZEN, D.H. (ed) Costa Rican Natural History. Univ. of Chicago Press. pp. 66-73
- BODMAN, G.B. and CONSTANTIN, G.K. 1965. Influence of particle size distribution in soil compaction. Hilgardia 36:576-591.
- BOUCHER, D.H. et al, 1983. Coffee. En JANZEN, D.H. (ed) Costa Rican Natural History. Univ. of Chicago Press. pp.86-88.
- BOURNEMIZA, E. 1976. Conservación de suelos en Centro América y Panamá; Un comentario y una proposición de cambio de enfoque. Rev.Biol.Trop. 24(1):83-85.
- BRAMS, E. 1971. Continuous cultivation of West African soils: organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorous. Plant and Soil 35:401-414.
- BRASELL, H.M. and SINCLAIR, D.F. 1983. Elements returned to forest floor in two rainforests and three plantation plots in tropical Australia. J.Ecol. 71:367-378.
- BRICEÑO, J.A. y PACHECO, R. 1984. Métodos analíticos para el estudio de Suelos y Plantas. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 152p.
- BUDOWSKI, G. 1976. Why save tropical forests? Some arguments for campaigning consevationists. Amazonia 4:529-638.
- COEN, E. 1983. Climate. En JANZEN, D.H. (ed). Costa Rican Natural History. Univ. of Chicago Press. pp. 35-46.
- COLEMAN, N.T. and THOMAS, G.W. 1967. The basic chemistry of soil acidity. Agron.Monogr. 12:1-41.
- CUNNINGHAM, R.K. 1963. The effect of clearing a tropical forest soil. J.SoilSci. 14:334-345.
- CHARREAU, C. 1972. Problemes posés par l'utilisation agricole del sols tropicaux par des cultures annuelles. Agron. Tropical (France) 27:905-929.

- DE LAS SALAS, G. y FOLSTER, H. 1976. Bioelement loss on clearing a tropical rain forest. Turrialba 26(2):179-186.
- DIAS, A.C.C.P. y NORTCLIFF, S. 1985. Effects of two land clearing methods on the physical properties of an Oxisol in the Brazilian Amazon. Trop.Agric.(Trinidad) 62(3):207-212.
- DUNCAN, D.B. 1955. Multiple range and multiple F-tests. Biometrics 11:1-42.
- EWEL, J. et al. 1981. Slash and burn impacts on a Costa Rican Wet Forest site. Ecology 62(3):816-829.
- FAGAMI A. et al. 1985 Nutrient distribution in the basement complex soils of the tropical dry rainforest of southwestern Nigeria: 2. Micronutrients- Zinc and Copper. Soil sci. 139(6):531-537.
- FOURNIER, L.A. 1970. Fundamentos de Ecología Vegetal I: Autoecología. Edición provisional. Departamento de Biología, Universidad de Costa Rica. (Mimeografiado). 88p.
- FOURNIER, L.A. 1976. Efecto del urbanismo sobre el futuro desarrollo agrícola de Costa Rica. Rev.Biol.Trop. 24(supl.1):49-55.
- FOURNIER, L.A. 1981. COSTA RICA. En KORMONDY, E.J. y McCORMICK, J.F. (eds). Handbook of Contemporary Developments in World Ecology. Greenwood Press. pp. 23-34
- FOURNIER, L.A. 1985. El sector forestal de Costa Rica: antecedentes y perspectivas. Agron.costarr. 9(2):253-260.
- FOURNIER, L.A. y CAMACHO DE CASTRO, Lucía. 1973. Producción y descomposición del mantillo en un bosque secundario húmedo de premontano. Rev.Biol.Trop. 21(1):59-67.
- FOURNIER, L.A. y HERRERA DE FOURNIER, María E. 1978. Cambios de la microflora del suelo en varias etapas de la sucesión en Ciudad Colón, Costa Rica. Rev.Biol.Trop. 26(1):103-112.
- FRIEDMAN, I. 1977. The Amazon Basin, another Sahel? Science 197:7.
- GAUANDE, S.A., 1972. Física de Suelos: principios y aplicaciones. Centro Regional de Ayuda Técnica. México/Buenos Aires. pp. 79-98.

- GONZALEZ, M.A. 1980. Manual de laboratorio de Edafología. Universidad de Costa Rica. Facultad de Agronomía. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 96p.
- GREENLAND, D.J. and DART, P.J. 1972 Biological and organic aspects of plant nutrition in relation to needed research in tropical soils. Tropical Soils Research Seminar. Int. Inst. for Trop. Agric., Ibadan, Nigeria. (mimeo). Citado en SANCHEZ, P.A. 1976. Properties and Management of soils in the Tropics. Wiley and Sons, New York. 618p.
- HALL, C. 1976. El Café y el desarrollo histórico-geográfico de Costa Rica. Editorial Costa Rica, San José. Citado en BOUCHER, D.H. et al, 1983. Coffee. En JANZEN, D.H. (ed) Costa Rican Natural History. Univ. of Chicago Press.pp. 86-88
- HAMBLIN, A.P. 1982. Soil water behavior in response to changes en soil structure J.SoilSci. 33:375-386.
- HARTSHORN et al. 1982. Costa Rica. Perfil ambiental. Estudio de campo. Organization for Tropical Studies. 151p.
- HERRERA, R. et al. 1978. Amazon ecosystems. Their structure and functioning with particular emphasis on nutrients. Interciencia 3(4):223-231.
- HUMBERT, R.P. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing sugar crops. II Sugarcane. En WALSH, L.M. y BEATON, J.D. (eds). Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Society of America. pp289-287.
- JANZEN, D.H. 1973. Tropical Agroecosystems. Science 182:1212-1219.
- JENNY, H. et al. 1948. Nitrogen and organic matter contents of equatorial soils of Colombia , South America. SoilSci. 66:173-186.
- JENNY, H. 1980. The soil resource: origin and behavior. Ecological Studies, v.37. Springer-Verlag NY Inc. 377p.
- JONES, J.B.,Jr. and ECK, H.V. 1973. En WALSH, L.M. y BEATON, J.D. (eds). Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Society of America. pp. 289-297.
- JONES, M.J. 1973. The organic matter content of the savanna soils of West Africa. J.SoilSci. 24:42-53.

- JUO, A.S.R. y LAL, R. 1977. The effect of fallow and continuous cultivation on the chemical and physical properties of an alfisol in Western Nigeria. Plant and Soil 47:567-584.
- JUO, A.S.R. y LAL, R. 1979. Nutrient profile in a Tropical Alfisol under conventional and no-till systems. Soil Sci. 127(3):168-173.
- KANG, B.T. 1977. Effect of some biological factors on soil variability in the tropics. II. Effect of Oil Pal tree (Elaeis guianensis). Plant and Soil. 47:451-462.
- KANG, B.T y MOORMAN, F.R. 1977. Effect of some biological factors on soil variability in the tropics. I: Effect of pre-clearing vegetation. Plant and Soil 47:441-449.
- KARIM, H. et al. 1976. The profile distribution of total and DTPA-extractable Cu in selected soils in Louisiana. SoilSci.PlantAnal. 7:437-452.
- LAL, R. 1975. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. IITA Tech. Bull. 1.
- LAL, R. 1976. No-tillage effects on soil properties under different crops in Western Nigeria. SoilSci.Soc.Am. J. 40:762-768.
- LAL, R. et al. 1986. Land clearing and development in the tropics. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands. 450p.
- LAMBERT, J.D.H. y ARNASON, J.T. 1986. Nutrient dynamics in milpa agriculture and the role of weeds in initial stages of secondary succession in Belize, C.A. Plant and Soil 93:303-322.
- LATHWELL, D.J. and BOULDIN, D.R. 1981. Soil organic matter and soil Nitrogen behavior en cropped soils. Trop. Agric. (Trinidad). 58(4):341-348.
- LETTEAU, H. et al 1979. Amazonia hydrologic cycle and the role of atmosphere recycling in assessing deforestation effects. Mon.WeatherRev. 107(3):227-238.
- MAPA, R.B. et al, 1986. Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. SoilSciSoc.Am.J. 50(5):1133-1138.
- MILES, J. 1985. The pedogenic effects of different species and vegetation types and implications of succession. J. Soil Sci. 36:571-584.

- MUELLER-HARVEY, I. et al. 1985. Soil organic C, N, S and P after forest clearance in Nigeria: mineralization rates and spatial variability. J. Soil Sci. 36:585-591.
- MYERS, N. 1976. An Expanded Approach to the Problem of Disappearing Species. Science 193:198-202.
- MYERS, N. 1980. Conversion of Tropical Moist forests. National Academy of Sciences. Wash. D.C. 205p.
- NAS (National Academy of Sciences). 1975. Suelos de las regiones tropicales húmedas. Buenos Aires. Ediciones Marymar. 271p.
- NICOU, R. 1972. Sythese des Etudes de physique du sol realises par l'IRAT en Afrique Tropicale Seche. Seminar on Tropical Soils Research. Int. Inst. for Trop. Agric., Ibadan, Nigeria. 19p.
- NRC (National Research Council). 1980. Research Priorities in Tropical Biology. National Academy of Sciences. 116p.
- NYE, P.H. and GREENLAND, D.J. 1960. The Soil Under Shifting Cultivation. Technical Communication # 51. Commonwealth Bureau of Soils. 156p.
- PARSONS, J.J. 1976. Forest to Pasture: development or destruction? Rev. Biol. Trop. 24(suppl 1):121-128.
- PARSONS, J.J. 1983. Beef Cattle. En JANZEN, D.H. (ed). Costa Rican Natural History. Univ. of Chicago Press. pp. 77-79.
- PETERSEN, R.G. 1977. Use and misuse of Multiple Comparison Procedures. Agron. J. 69:205-208
- POPENOE, H.L. 1957. The influence of the shifting cultivation cycle on soil properties in Central America. Proc. 9th Pacific Sci Congr. (Bangkok) 7:72-77. Citado en SANCHEZ, P.A. 1976. Properties and Management of soils in the Tropics. Wiley and Sons, New York. 618p.
- POSNER, J.L. Y MCPHERSON, M.F. 1981. Las áreas de la ladera de México, Centro América, el Caribe y los países andinos: situación actual y perspectivas para el año 2000. En NOVOA, A.R. y POSNER, J.L. (eds) Seminario Internacional Sobre Producción Agropecuaria y Forestal en Zonas de Ladera en América Tropical. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

- PRB (Population Reference Bureau). 1979. World Population Data Sheet. Wash. D.C.
- ROBINSON, M.H. 1978. IS Tropical biology real? Trop.Ecol. 19(1):30-50.
- SANCHEZ, P.A. 1976. Properties and Management of soils in the Tropics. Wiley and Sons, New York. 618p.
- SANCHEZ, P.A., BANDY, D.E., VILLACHICA, J.H. y NICHOLAIDES, J.J. 1982. Amazon Basin Soils: Management for Continuous Crop Production. Science. 216(may):821-827
- SCHWEIZER, Susana, et al,. 1980. Metodología para análisis de Suelos, Plantas y Aguas. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Boletín Técnico #68. San Jose, Costa Rica.
- SHARMA, M.L. et al, 1980. Spacial variability of infiltration of a watershed. J.Hydrol. 45:101-122.
- STARK, N.M. y JORDAN, C.F. 1978. Nutrient retention by the root mat of an Amazon Rain Forest. Ecology 59(3):434-437.
- SUAREZ DE CASTRO, F. y RODRIGUEZ, A. 1955. Pérdidas por erosión de elementos nutritivos bajo diferentes cubiertas vegetales y con varias prácticas de conservación de suelos. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bol Tec. 14.
- SUAREZ DE CASTRO, F. y RODRIGUEZ, A. 1958. Movimiento del agua en el suelo. Estudios con lisímetros monolíticos. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bol. Tec. 2(19):1-19.
- SWALLOW, W.H. 1984. Those overworked and oft-misused Mean Separation Procedures- Duncan's, LSD. etc. Plant Disease 68:919-921.
- TATE, R.L. 1987. Soil Organic matter: biological and ecological effects. John Wiley and Sons, Inc. New York. 291p.
- THOMPSON, L.M. y TROEH, F.R. 1982. Los suelos y su fertilidad. Editorial Reverte, S.A. Barcelona. 649p.
- TOKY, O.P. y RAMAKRISHNAN, P.S. 1983. Secondary succession following slash and burn agriculture in North-eastern India. II. Nutrient Cycling. J. Ecol. 71:747-757
- TOSI, J.A. 1969. Mapa Ecológico de Costa Rica. Tropical Science Center.

- TOSI, J.A. 1972. Una clasificación y metodología para la determinación y levantamiento de mapas de la capacidad de uso mayor de la tierra. TSC. Facsimile Series, No.7. 69p.
- TOSI, J.A. 1986. Una clasificación y metodología para la determinación y levantamiento de mapas de la capacidad de uso mayor de la tierra. Manual de campo. Centro Científico Tropical. 66p.
- TROUSE, A.C.Jr., and HUMBERT, R.P. 1961. Some effects of soil compaction on the development of sugarcane roots. Soil Sci 91:208-217.
- VAN WAMBEKE, A.R. 1962. Criteria for classifying tropical soils by age. J. Soil Sci. 13:124-132.
- VASQUEZ, A. 1979. Mapa generalizado de Suelos. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección de investigaciones agrícolas. Unidad de Suelos.
- VILLA NOVA, N.A. et al 1976. Estimative de evapotranspiracao na Bacia Amazonica. Acta Amazonica 6(2):215-228.
- VOMOCIL, J.A. 1965. Porosity. In BLACK, C.A. (Ed). Methods of Soil Analysis. A.S.A. Agronomy Monograph #9. Part 1. pp.299-300.
- WARRICK, A.W. and NIELSON, D.R. 1980. Spacial variability of soil physical properties in the field. In HILLEL, D. (ed). Applications of soil physics. Academic Press, NY. pp. 119-136.
- WITTER, S.H. 1975. Food Production: Technology and the Resource Base. Science 188:579-584.
- YOUNG, A. 1976. Tropical soils and soil survey. Cambridge University Press. New York. 468p.

AFENDICE

ANALISIS DE VARIANCIA (ANDEVA)

S.C. = Suma de cuadrados

g.l. = Grados de libertad

C.M. = Cuadrado medio

Variable dependiente: arcilla

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 4239,54 | 6 | 706,59 | 32,55 | 0,0000 |
| veg | 1607,12 | 3 | 535,71 | 24,68 | 0,0000 |
| prof | 2204,17 | 1 | 2204,2 | 101,5 | 0,0000 |
| tiempo | 428,250 | 2 | 214,12 | 9,363 | 0,0002 |
| Interacciones | 1364,75 | 11 | 124,07 | 5,715 | 0,0000 |
| veg x prof | 818,167 | 3 | 272,72 | 12,56 | 0,0000 |
| veg x tiemp | 509,250 | 6 | 84,875 | 3,910 | 0,0018 |
| prof x tiemp | 37,3333 | 2 | 18,667 | 0,860 | 0,4272 |
| Residual | 1693,33 | 78 | 21,709 | | |
| Total | 7297,62 | 95 | | | |

Variable dependiente: arena

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 1928,27 | 6 | 321,38 | 4,974 | 0,0002 |
| veg | 866,365 | 3 | 288,79 | 4,469 | 0,0060 |
| prof | 1060,01 | 1 | 1060,0 | 16,40 | 0,0001 |
| tiempo | 1,89583 | 2 | 0,9479 | 0,015 | 0,9854 |
| Interacciones | 4891,74 | 11 | 444,70 | 6,882 | 0,0000 |
| veg x prof | 401,365 | 3 | 133,79 | 2,071 | 0,1109 |
| veg x tiempo | 1958,85 | 6 | 326,48 | 5,053 | 0,0002 |
| prof x tiempo | 2531,52 | 2 | 1265,8 | 19,59 | 0,0000 |
| Residual | 5039,98 | 78 | 64,615 | | |
| Total | 11860,0 | 95 | | | |

Variable dependiente: limo

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 885,000 | 6 | 147,50 | 3,641 | 0,0031 |
| veg | 303,542 | 3 | 101,18 | 2,497 | 0,0658 |
| prof | 198,375 | 1 | 198,38 | 4,896 | 0,0298 |
| tiempo | 383,083 | 2 | 191,54 | 4,728 | 0,0115 |
| Interacciones | 3502,71 | 11 | 318,43 | 7,859 | 0,0000 |
| veg x prof | 166,875 | 3 | 55,625 | 1,373 | 0,2573 |
| veg x tiempo | 874,083 | 6 | 145,68 | 3,596 | 0,0034 |
| prof x tiempo | 2461,75 | 2 | 1230,9 | 30,38 | 0,0000 |
| Residual | 3160,25 | 78 | 40,516 | | |
| Total | 7547,96 | 95 | | | |

Variable dependiente: Densidad de partículas (Dp)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 1,64053 | 6 | 0,2734 | 30,01 | 0,0000 |
| veg | 0,27699 | 3 | 0,0923 | 10,13 | 0,0000 |
| prof | 0,15844 | 1 | 0,1584 | 17,39 | 0,0001 |
| tiempo | 1,20511 | 2 | 0,6026 | 66,14 | 0,0000 |
| Interacciones | 0,23878 | 11 | 0,0217 | 2,383 | 0,0134 |
| veg x prof | 0,12130 | 3 | 0,0404 | 4,438 | 0,0062 |
| veg x tiempo | 0,10418 | 6 | 0,0174 | 1,906 | 0,0903 |
| prof x tiempo | 0,01330 | 2 | 0,0066 | 0,730 | 0,4852 |
| Residual | 0,71058 | 78 | 0,0091 | | |
| Total | 2,58990 | 95 | | | |

Variable dependiente: Densidad aparente (Da)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 1,40278 | 6 | 0,2338 | 16,69 | 0,0000 |
| veg | 1,21204 | 3 | 0,4040 | 28,85 | 0,0000 |
| prof | 0,16335 | 1 | 0,1634 | 11,66 | 0,0010 |
| tiempo | 0,02738 | 2 | 0,0137 | 0,978 | 0,3808 |
| Interacciones | 0,44285 | 11 | 0,0403 | 2,875 | 0,0032 |
| veg x prof | 0,19741 | 3 | 0,0658 | 4,699 | 0,0046 |
| veg x tiempo | 0,17865 | 6 | 0,0298 | 2,126 | 0,0595 |
| prof x tiempo | 0,06679 | 2 | 0,0334 | 2,385 | 0,0988 |
| Residual | 1,09237 | 78 | 0,0140 | | |
| Total | 2,93800 | 95 | | | |

Variable dependiente: porosidad

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 2093,87 | 6 | 348,98 | 14,77 | 0,0000 |
| veg | 1196,86 | 3 | 398,95 | 16,89 | 0,0000 |
| prof | 158,107 | 1 | 158,11 | 6,693 | 0,0115 |
| tiempo | 738,896 | 2 | 369,45 | 15,64 | 0,0000 |
| Interacciones | 786,461 | 11 | 71,496 | 3,027 | 0,0021 |
| veg x prof | 305,602 | 3 | 101,87 | 4,313 | 0,0072 |
| veg x tiempo | 306,799 | 6 | 51,133 | 2,165 | 0,0553 |
| prof x tiempo | 174,060 | 2 | 87,030 | 3,684 | 0,0296 |
| Residual | 1842,44 | 78 | 23,621 | | |
| Total | 4722,77 | 95 | | | |

Variable dependiente: Retención de agua a Capacidad de Campo (aguaCC)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 15015,7 | 6 | 2502,6 | 49,59 | 0,0000 |
| veg | 3553,65 | 3 | 1184,6 | 23,47 | 0,0000 |
| prof | 1437,63 | 1 | 1437,6 | 28,48 | 0,0000 |
| tiempo | 10024,4 | 2 | 5012,2 | 99,31 | 0,0000 |
| Interacciones | 2780,95 | 11 | 252,81 | 5,009 | 0,0000 |
| veg x prof | 1530,58 | 3 | 510,19 | 10,11 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 977,298 | 6 | 162,88 | 3,227 | 0,0069 |
| prof x tiempo | 273,068 | 2 | 136,53 | 2,705 | 0,0731 |
| Residual | 3936,65 | 78 | 50,470 | | |
| Total | 21733,3 | 95 | | | |

Variable dependiente: Retención de agua al Punto de marchitez permanente (aguaPMP)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1ariora | 6962,41 | 6 | 1160,4 | 31,32 | 0,0000 |
| veg | 1260,54 | 3 | 420,18 | 11,34 | 0,0000 |
| prof | 710,682 | 1 | 710,68 | 19,18 | 0,0000 |
| tiempo | 4991,18 | 2 | 2495,6 | 67,36 | 0,0000 |
| Interacciones | 1288,77 | 11 | 117,16 | 3,162 | 0,0014 |
| veg x prof | 1030,42 | 3 | 343,47 | 9,271 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 234,387 | 6 | 39,065 | 1,054 | 0,3972 |
| prof x tiempo | 23,9590 | 2 | 11,979 | 0,323 | 0,7247 |
| Residual | 2889,84 | 78 | 37,049 | | |
| Total | 11141,0 | 95 | | | |

Variable dependiente: agua útil

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1ariora | 1677,56 | 6 | 279,59 | 32,67 | 0,0000 |
| veg | 675,863 | 3 | 225,29 | 26,32 | 0,0000 |
| prof | 126,271 | 1 | 126,27 | 14,75 | 0,0002 |
| tiempo | 875,424 | 2 | 437,71 | 51,14 | 0,0000 |
| Interacciones | 1536,47 | 11 | 139,68 | 16,32 | 0,0000 |
| veg x prof | 101,654 | 3 | 33,885 | 3,959 | 0,0111 |
| veg x tiempo | 1258,18 | 6 | 209,70 | 24,50 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 176,637 | 2 | 88,318 | 10,32 | 0,0001 |
| Residual | 667,630 | 78 | 8,5594 | | |
| Total | 3881,66 | 95 | | | |

Variable dependiente: Conductividad hidráulica (CondH)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|----------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 72692,2 | 6 | 12115 | 10,71 | 0,0000 |
| veg | 50005,3 | 3 | 16668 | 14,74 | 0,0000 |
| prof | 7277,73 | 1 | 7277,7 | 6,434 | 0,0132 |
| tiempo | 15409,2 | 2 | 7704,6 | 6,811 | 0,0019 |
| Interacciones | 30382,0 | 11 | 2762,0 | 2,442 | 0,0113 |
| veg x prof | 8325,92 | 3 | 2775,3 | 2,454 | 0,0694 |
| veg x tiempo | 20786,1 | 6 | 3464,4 | 3,063 | 0,0096 |
| prof x tiempo | 1270,00 | 2 | 635,00 | 0,561 | 0,5727 |
| Residual | 88228,6 | 78 | 1131,1 | | |
| Total | 191302,9 | 95 | | | |

Variable dependiente: Materia orgánica (MO)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos farios | 403,762 | 6 | 67,288 | 51,49 | 0,0000 |
| veg | 116,280 | 3 | 38,760 | 29,66 | 0,0000 |
| prof | 255,911 | 1 | 255,91 | 195,8 | 0,0000 |
| tiempo | 31,5360 | 2 | 15,768 | 12,07 | 0,0000 |
| Interacciones | 122,910 | 11 | 11,174 | 8,551 | 0,0000 |
| veg x prof | 98,4054 | 3 | 32,802 | 25,10 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 19,3288 | 6 | 3,2215 | 2,465 | 0,0310 |
| prof x tiempo | 5,17538 | 2 | 2,5877 | 1,980 | 0,1449 |
| Residual | 101,922 | 78 | 1,3067 | | |
| Total | 628,557 | 95 | | | |

Variable dependiente: pH

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos farios | 11,9200 | 6 | 1,9867 | 49,96 | 0,0000 |
| veg | 8,68750 | 3 | 2,8958 | 72,82 | 0,0000 |
| prof | 0,00667 | 1 | 0,0067 | 0,168 | 0,6877 |
| tiempo | 3,22583 | 2 | 1,6129 | 40,56 | 0,0000 |
| Interacciones | 3,03167 | 11 | 0,2756 | 6,931 | 0,0000 |
| veg x prof | 0,21083 | 3 | 0,0703 | 1,767 | 0,1603 |
| veg x tiempo | 2,45500 | 6 | 0,4092 | 10,29 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 0,36583 | 2 | 0,1829 | 4,600 | 0,0129 |
| Residual | 3,10167 | 78 | 0,0398 | | |
| Total | 18,0533 | 95 | | | |

Variable dependiente: Aluminio (Al)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 1,87297 | 6 | 0,3122 | 14,96 | 0,0000 |
| veg | 0,73302 | 3 | 0,2443 | 11,71 | 0,0000 |
| prof | 0,28167 | 1 | 0,2817 | 13,50 | 0,0004 |
| tiempo | 0,85828 | 2 | 0,4291 | 20,56 | 0,0000 |
| Interacciones | 0,74562 | 11 | 0,0678 | 3,248 | 0,0011 |
| veg x prof | 0,33812 | 3 | 0,1127 | 5,400 | 0,0020 |
| veg x tiempo | 0,34339 | 6 | 0,0572 | 2,742 | 0,0180 |
| prof x tiempo | 0,06411 | 2 | 0,0321 | 1,536 | 0,2217 |
| Residual | 1,62797 | 78 | 0,0209 | | |
| Total | 4,24656 | 95 | | | |

Variable dependiente: Fósforo (P)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 257,770 | 6 | 42,962 | 11,85 | 0,0000 |
| veg | 178,083 | 3 | 59,361 | 16,38 | 0,0000 |
| prof | 32,6667 | 1 | 32,667 | 9,012 | 0,0036 |
| tiempo | 47,0208 | 2 | 23,510 | 6,486 | 0,0025 |
| Interacciones | 178,833 | 11 | 16,258 | 4,485 | 0,0000 |
| veg x prof | 8,58333 | 3 | 2,8611 | 0,789 | 0,5035 |
| veg x tiempo | 160,479 | 6 | 26,747 | 7,379 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 9,77083 | 2 | 4,8854 | 1,348 | 0,2658 |
| Residual | 282,729 | 78 | 3,6247 | | |
| Total | 719,333 | 95 | | | |

Variable dependiente: Potasio (K)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 9,26771 | 6 | 1,5446 | 36,23 | 0,0000 |
| veg | 3,53412 | 3 | 1,1780 | 27,63 | 0,0000 |
| prof | 1,85648 | 1 | 1,8565 | 43,54 | 0,0000 |
| tiempo | 3,87710 | 2 | 1,9386 | 45,46 | 0,0000 |
| Interacciones | 3,40099 | 11 | 0,3092 | 7,251 | 0,0000 |
| veg x prof | 0,71500 | 3 | 0,2383 | 5,590 | 0,0016 |
| veg x tiempo | 2,48854 | 6 | 0,4148 | 9,727 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 0,19744 | 2 | 0,0987 | 2,315 | 0,1055 |
| Residual | 3,32576 | 78 | 0,0426 | | |
| Total | 15,9944 | 95 | | | |

Variable dependiente: Calcio (Ca)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 886,589 | 6 | 147,76 | 43,91 | 0,0000 |
| veg | 830,729 | 3 | 276,91 | 82,28 | 0,0000 |
| prof | 2,66667 | 1 | 2,6667 | 0,792 | 0,3856 |
| tiempo | 53,1927 | 2 | 26,596 | 7,903 | 0,0007 |
| Interacciones | 402,375 | 11 | 36,580 | 10,87 | 0,0000 |
| veg x prof | 314,021 | 3 | 104,67 | 31,10 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 54,2865 | 6 | 9,0477 | 2,689 | 0,0200 |
| prof x tiempo | 34,0677 | 2 | 17,034 | 5,062 | 0,0086 |
| Residual | 262,495 | 78 | 3,3653 | | |
| Total | 1551,46 | 95 | | | |

Variable dependiente: Magnesio (Mg)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|----------|------|--------|-------|--------|
| Efectos farios | 223,414 | 6 | 37,236 | 114,4 | 0,0000 |
| veg | 215,665 | 3 | 71,888 | 221,8 | 0,0000 |
| prof | 0,035042 | 1 | 0,3504 | 1,081 | 0,3016 |
| tiempo | 7,39771 | 2 | 3,6989 | 11,41 | 0,0000 |
| Interacciones | 7,80875 | 11 | 0,7099 | 2,191 | 0,0231 |
| veg x prof | 6,84708 | 3 | 2,2824 | 7,043 | 0,0003 |
| veg x tiempo | 0,34146 | 6 | 0,0569 | 0,176 | 0,9827 |
| prof x tiempo | 0,62021 | 1 | 0,3101 | 0,957 | 0,3885 |
| Residual | 25,2773 | 78 | 0,3241 | | |
| Total | 256,500 | 95 | | | |

Variable dependiente: Relación Ca/K

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos farios | 111065 | 6 | 18511 | 20,99 | 0,0000 |
| veg | 64286,3 | 3 | 21429 | 24,30 | 0,0000 |
| prof | 26365,2 | 1 | 26365 | 29,90 | 0,0000 |
| tiempo | 20413,0 | 2 | 10206 | 11,58 | 0,0000 |
| Interacciones | 47715,2 | 11 | 4337,7 | 4,920 | 0,0000 |
| veg x prof | 22468,7 | 3 | 7489,6 | 8,494 | 0,0001 |
| veg x tiempo | 15246,9 | 6 | 2541,1 | 2,882 | 0,0137 |
| prof x tiempo | 9999,64 | 2 | 4999,8 | 5,670 | 0,0050 |
| Residual | 68775,8 | 78 | 881,74 | | |
| Total | 227556 | 95 | | | |

Variable dependiente: Ca/Mg

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 40,1721 | 6 | 6,6954 | 11,04 | 0,0000 |
| veg | 34,0957 | 3 | 11,365 | 18,75 | 0,0000 |
| prof | 0,15925 | 1 | 0,1593 | 0,263 | 0,6152 |
| tiempo | 5,91716 | 2 | 2,9586 | 4,880 | 0,0101 |
| Interacciones | 15,4145 | 11 | 1,4013 | 2,311 | 0,0164 |
| veg x prof | 5,07770 | 3 | 1,6926 | 2,792 | 0,0459 |
| veg x tiempo | 8,03964 | 6 | 1,3399 | 2,210 | 0,0507 |
| prof x tiempo | 2,29716 | 2 | 1,1486 | 1,895 | 0,1572 |
| Residual | 47,2872 | 78 | 0,6062 | | |
| Total | 102,874 | 95 | | | |

Variable dependiente: Mg/K

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | 17297,4 | 6 | 2882,9 | 19,98 | 0,0000 |
| veg | 11818,2 | 3 | 3939,4 | 27,30 | 0,0000 |
| prof | 2460,59 | 1 | 2460,6 | 17,05 | 0,0001 |
| tiempo | 3018,62 | 2 | 1509,3 | 10,46 | 0,0001 |
| Interacciones | 6738,22 | 11 | 612,57 | 4,245 | 0,0001 |
| veg x prof | 2585,22 | 3 | 861,74 | 5,971 | 0,0010 |
| veg x tiempo | 3084,78 | 6 | 514,13 | 3,562 | 0,0036 |
| prof x tiempo | 1068,22 | 2 | 534,11 | 3,701 | 0,0291 |
| Residual | 11256,9 | 78 | 144,32 | | |
| Total | 35292,6 | 95 | | | |

Variable dependiente: Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 1729,75 | 6 | 288,29 | 58,84 | 0,0000 |
| veg | 1670,25 | 3 | 556,75 | 113,6 | 0,0000 |
| prof | 1,43815 | 1 | 1,4382 | 0,294 | 0,5953 |
| tiempo | 58,0577 | 2 | 29,029 | 5,925 | 0,0040 |
| Interacciones | 552,959 | 11 | 50,269 | 10,26 | 0,0000 |
| veg x prof | 436,124 | 3 | 145,37 | 29,67 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 82,5689 | 6 | 13,761 | 2,809 | 0,0158 |
| prof x tiempo | 34,2661 | 2 | 17,133 | 3,497 | 0,0351 |
| Residual | 382,142 | 78 | 4,8993 | | |
| Total | 2664,85 | 95 | | | |

Variable dependiente: Saturación de acidez

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos 1arios | 235,824 | 6 | 39,304 | 8,680 | 0,0000 |
| veg | 142,570 | 3 | 47,523 | 10,49 | 0,0000 |
| prof | 36,1744 | 1 | 36,174 | 7,988 | 0,0060 |
| tiempo | 57,0800 | 2 | 28,540 | 6,303 | 0,0029 |
| Interacciones | 105,124 | 11 | 9,5567 | 2,110 | 0,0290 |
| veg x prof | 56,3455 | 3 | 18,782 | 4,148 | 0,0088 |
| veg x tiempo | 38,9789 | 6 | 6,4965 | 1,435 | 0,2122 |
| prof x tiempo | 9,79958 | 2 | 4,8998 | 1,082 | 0,3439 |
| Residual | 353,210 | 78 | 4,5283 | | |
| Total | 694,158 | 95 | | | |

Variable dependiente: Manganeso (Mn)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.F. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos farios | 2874,60 | 6 | 479,10 | 26,23 | 0,0000 |
| veg | 1106,71 | 3 | 368,90 | 20,20 | 0,0000 |
| prof | 600,000 | 1 | 600,00 | 32,85 | 0,0000 |
| tiempo | 1167,90 | 2 | 583,95 | 31,97 | 0,0000 |
| Interacciones | 1350,54 | 11 | 122,78 | 6,721 | 0,0000 |
| veg x prof | 482,250 | 3 | 160,75 | 8,800 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 705,104 | 6 | 117,52 | 6,433 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 163,188 | 2 | 81,594 | 4,467 | 0,0146 |
| Residual | 1424,81 | 78 | 18,267 | | |
| Total | 5649,96 | 95 | | | |

Variable dependiente: Cinc (Zn)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos farios | 161,709 | 6 | 26,951 | 7,804 | 0,0000 |
| veg | 64,4686 | 3 | 21,490 | 6,222 | 0,0008 |
| prof | 14,1834 | 1 | 14,183 | 4,107 | 0,0461 |
| tiempo | 83,0565 | 2 | 41,528 | 12,02 | 0,0000 |
| Interacciones | 49,3086 | 11 | 4,4826 | 1,298 | 0,2416 |
| veg x prof | 17,8420 | 3 | 5,9473 | 1,722 | 0,1693 |
| veg x tiempo | 24,0860 | 6 | 4,0143 | 1,162 | 0,3351 |
| prof x tiempo | 7,38062 | 2 | 3,6903 | 1,068 | 0,3485 |
| Residual | 269,393 | 78 | 3,4538 | | |
| Total | 480,410 | 95 | | | |

Variable dependiente: Cobre (Cu)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|----------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | | | | | |
| veg | 2655,27 | 6 | 442,55 | 75,44 | 0,0000 |
| prof | 2087,58 | 3 | 695,86 | 118,6 | 0,0000 |
| tiempo | 80,6667 | 1 | 80,667 | 13,75 | 0,0004 |
| | 487,021 | 2 | 243,51 | 41,51 | 0,0000 |
| Interacciones | | | | | |
| veg x prof | 782,500 | 11 | 71,136 | 12,13 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 282,750 | 3 | 94,250 | 16,07 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 434,479 | 6 | 72,413 | 12,34 | 0,0000 |
| | 65,2708 | 2 | 32,635 | 5,563 | 0,0055 |
| Residual | 457,562 | 78 | 5,8662 | | |
| Total | 3895,33 | 95 | | | |

Variable dependiente: Hierro (Fe)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|----------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Efectos fijos | | | | | |
| veg | 72394,4 | 6 | 12066 | 42,34 | 0,0000 |
| prof | 61441,4 | 3 | 20480 | 71,87 | 0,0000 |
| tiempo | 5812,59 | 1 | 5812,6 | 20,40 | 0,0000 |
| | 5140,40 | 2 | 2570,2 | 9,020 | 0,0003 |
| Interacciones | | | | | |
| veg x prof | 20920,6 | 11 | 1901,9 | 6,674 | 0,0000 |
| veg x tiempo | 15203,9 | 3 | 5068,0 | 17,79 | 0,0000 |
| prof x tiempo | 4604,35 | 6 | 767,39 | 2,693 | 0,0199 |
| | 1112,31 | 2 | 556,16 | 1,952 | 0,1489 |
| Residual | 22226,5 | 78 | 284,96 | | |
| Total | 115541 | 95 | | | |

Variable dependiente: Altura final de Maíz

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| vegetación | 7586,60 | 3 | 2528,9 | 11,66 | 0,0000 |
| Residual | 5854,18 | 27 | 216,82 | | |
| Total | 13440,8 | 30 | | | |

Variable dependiente: peso seco total de maíz

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Vegetación | 249,854 | 3 | 83,285 | 23,85 | 0,0000 |
| Residual | 94,2705 | 27 | 3,4915 | | |
| Total | 344,124 | 30 | | | |

Variable dependiente: Peso total/Altura (Vigor)

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Vegetación | 0,00994 | 3 | 0,0033 | 18,76 | 0,0000 |
| Residual | 0,00477 | 27 | 0,0002 | | |
| Total | 0,01471 | 30 | | | |

Variable dependiente: peso de vástago

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F. | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Vegetación | 101,792 | 3 | 33,931 | 52,30 | 0,0000 |
| Residual | 17,5171 | 27 | 0,6488 | | |
| Total | 119,309 | 30 | | | |

Variable dependiente: peso de raíz

| Fuente de variación | S.C. | g.l. | C.M. | F | Prob. |
|---------------------|---------|------|--------|-------|--------|
| Vegetación | 35,7450 | 3 | 11,915 | 7,616 | 0,0008 |
| Residual | 42,2427 | 27 | 1,5645 | | |
| Total | 77,9878 | 30 | | | |