CATIE Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Tropical Agricultural Research and Higher Education Center

PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa* AAA) y plátano (*Musa* AAB) en el valle de Talamanca, Costa Rica

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar por el grado de:

Magister Scientiae en Agricultura Ecológica

Por

Rolando Hermes Cerda Bustillos

Turrialba, Costa Rica, 2008

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE, y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

***Magister Scientiae* en Agricultura Ecológica**

FIRMANTES:

Gabriela Soto
Consejera Principal

Eduardo Somarriba
Miembro del Comité Consejero

Ana Tapia
Miembro del Comité Consejero

Wagner Peña
Miembro del Comité Consejero

Jayne Crozier
Miembro del Comité Consejero

Glenn Galloway
Decano de la Escuela de Posgrado

Rolando Hermes Cerda Bustillos
Candidato

DEDICATORIA

A Dios, por todo lo que me dio, me da y me dará, y por permitirme vivir y disfrutar cada día

A mi mamá Susana y mi papá Jorge, sin ellos que me dieron la vida, su cariño y comprensión, la educación necesaria y el apoyo incondicional, este trabajo no hubiera sido posible

A mi hermana Rocío, un ángel de Dios, por el compromiso en vida que tengo con ella

AGRADECIMIENTOS

A mi consejera principal Gabriela Soto, por su amistad, sabios consejos, apoyo y correcciones desde que inició la maestría hasta la elaboración de este documento.

Al Dr. Eduardo Somarriba, por su amistad, confianza, enseñanza, colaboración y oportunidades brindadas desde hace varios años, y por sus acertadas correcciones en este documento.

A todos los miembros del comité consejero, por el tiempo que me brindaron durante todo lo que significó la elaboración de la Tesis, y por las correcciones y consejos en beneficio del presente documento.

Al CATIE, Proyecto Cacao Centroamérica y USDA por haber financiado el trabajo de campo y la elaboración del documento de Tesis.

A todos los agricultores y amigos en Talamanca, en especial a Jason Chale y Javier Méndez que me asistieron y acompañaron durante el trabajo de campo.

A la señora Irene Selles, por su hospitalidad, amistad, alegría y gratos momentos compartidos durante el tiempo que me alojó en su casa de Shiroles, Talamanca.

A mis mejores amigos del CATIE, con quienes compartí experiencias inolvidables estos dos años y por todo su apoyo.

A mis mejores amigos de colegio y universidad en Bolivia, quienes a pesar de la distancia también me acompañaron y me apoyaron durante estos dos años.

CONTENIDO

DEDICATORIA ……...……..III
AGRADECIMIENTOS ……IV
CONTENIDO ……..V
RESUMEN ……...VII
ABSTRACT ……VIII
ÍNDICE DE CUADROS ……IX
ÍNDICE DE FIGURAS ……...X

1. INTRODUCCIÓN ……..1
1.1 Objetivo general ……3
1.2 Objetivos específicos ……..3
2. MATERIALES Y MÉTODOS ……..4
2.1 Descripción del área de estudio……...4
2.2 Selección de sistemas (tratamientos) y parcelas de estudio ……..……..5
2.3 Caracterización de los sistemas seleccionados ……...7
2.4 Indicadores de calidad de suelos seleccionados y épocas de muestreo ……..7
2.5 Muestreo de suelos, lombrices, densidad aparente y hojarasca ……...……..7
2.6 Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA) ……10
2.7 Métodos estadísticos ……10
2.7.1 Diseños y modelos ……..10
2.7.2 Análisis univariado ……11
2.7.3 Análisis multivariado ……11
3. RESULTADOS 12
3.1 Caracterización de los sistemas ……12
3.2 Indicadores químicos 14
3.3 Indicadores físicos 15
3.4 Porcentaje y contenido de C en agregados y fraccionamiento de la materia orgánica……16
3.5 Indicadores biológicos ……..18
3.6 Análisis de conglomerados ……...24
3.7 Indicadores de mayor peso seleccionados con análisis discriminante y ANOVA ……...25
3.8 Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) para sistemas y conglomerados ……25

3.9 Análisis de componentes principales ……...25
3.10 Selección de 12 indicadores de mayor peso para determinar calidad de suelos …….27
3.11 Índice de calidad de suelos aditivo (ICSA) ……27
4. DISCUSIÓN …….....28
4.1 Índice de calidad de suelos aditivo (ICSA) ..……28
4.2 Materia orgánica ……..…….28
4.3 Porcentaje y contenido de C en agregados y fraccionamiento de materia orgánica ……29
4.4 Fertilidad (Nutrientes) ……..30
4.5 Textura y humedad ……..……..32
4.6 Densidad aparente (DA), % de agregación y materia orgánica ……...33
4.7 Lombrices……..33
4.8 Nemátodos…….34
4.9 Biomasa microbiana …….35
4.10 Poblaciones de microorganismos……35
4.11 Actividad microbiana ……..……...37
4.11.1 Respiración microbiana…...……37
4.11.2 Cociente metabólico……38
4.11.3 Índice de mineralización del C ……...39
4.11.4 Actividad enzimática catalasa ……40
4.12 Correlaciones entre biomasa microbiana, actividad microbiana y materia orgánica …….40
4.13 Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) y análisis de conglomerados ……...41
4.14 Selección de 12 indicadores de mayor peso para determinar calidad de suelos ……..……...42
5. CONCLUSIONES ……43
6. RECOMENDACIONES ……..44
7. LITERATURA CITADA ……45
8. ANEXOS ……..50

Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa* AAA) y plátano (*Musa* AAB) en el valle de Talamanca, Costa Rica

RESUMEN

Se comparó la calidad de suelos en sistemas agroforestales de cacao-laurel (*Cordia alliodora*) (CL) y banano-laurel (BL), cacao monocultivo (CM), plátano monocultivo convencional (PMC) y barbecho (BARB) que fue el control. En el PMC, se hacen prácticas culturales frecuentes y se aplican fertilizantes y plaguicidas sintéticos. En los otros sistemas (orgánicos), el manejo es escaso y no se aplica ningún tipo de insumos. Se midieron más de 50 indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad de suelos. Se hicieron análisis univariados (ANOVA) y multivariados (MANOVA) de la varianza, se calculó un índice de calidad de suelos aditivo (ICSA) con los indicadores mencionados y se seleccionaron los indicadores de mayor peso.

Con base en el ICSA, el BARB tiene la mejor calidad de suelos; el PMC es igual a los sistemas agroforestales (CL y BL) gracias a la fertilización; y el CL es mejor que el CM. Con base en el ANOVA y MANOVA el CL fue el más parecido al BARB en los indicadores de calidad de suelos. En el PMC se registró mayor contenido de P, K, Ca y Mg y mejor pH que en los otros sistemas por la aplicación de fertilizantes sintéticos, pero su menor % de N indica pérdidas importantes de este nutriente. En el BARB, BL, CL y CM hubo deficiencia de P y K. En el BARB y CL se registró mayor % de materia orgánica, C en diferentes agregados y fracciones de materia orgánica, y % de N. Las condiciones de porosidad y aireación fueron mejores en el BARB y CL porque presentaron menor densidad aparente (DA) y mayor % de agregados de 8 – 2 mm que los otros sistemas. La biomasa microbiana, poblaciones de microorganismos en general y poblaciones de lombrices fueron mayores en el BARB y CL; en cuanto a poblaciones de nemátodos no hubo diferencias claras. Los indicadores de actividad microbiana (respiración microbiana, cociente metabólico, índice de mineralización del C, actividad enzimática catalasa), en general, fueron más estables en el BARB, BL, CL y CM. Mientras que en el PMC, en la época lluviosa, se evidenció un desequilibro notorio, provocado por la aplicación de fertilizantes y plaguicidas sintéticos. Se puede deducir que estos insumos sintéticos pueden incrementar la actividad microbiana pero pueden ser deletéreos para la biomasa microbiana, lo que deriva en un "estrés de los microorganismos". Los indicadores de calidad de suelos de mayor peso que se recomiendan en futuros estudios de este tipo son: respiración microbiana, biomasa microbiana, lombrices, micoparásitos, actinomicetes, nemátodos fitopatógenos, pH, C total, N total, K, DA y % de agregación.

Palabras clave: sistemas agroforestales, indicadores, materia orgánica, actividad microbiana, índice de calidad de suelos.

Soil quality in cacao (*Theobroma cacao*), banana (*Musa* AAA) and plantain (*Musa* AAB) plantations in Talamanca valley, Costa Rica

ABSTRACT

Soil quality was compared in agroforestry systems of cacao-laurel (*Cordia alliodora*) (CL) and banana-laurel (BL), monoculture cacao (MC), conventional monoculture plantain (CMP) and fallow (FA) which was the control. In CMP, agricultural practices are frequent and synthetic fertilizers and pesticides are applied. In the other systems (organics), management is poor and there is no application of any agricultural supply. More than 50 physical, chemical and biological indicators of soil quality were measured. Univariate analysis (ANOVA) and multivariate analysis (MANOVA) of the variance were performed, an additive soil quality index (ASQI) was calculated with the mentioned indicators and the major weight indicators were selected.

According with the ASQI, the FA has the best soil quality; the CMP is equal to the agroforestry systems (CL and BL) as a result of the fertilization; and the CL is better than the MC. According with the ANOVA and MANOVA the CL was the most similar to FA in the soil quality indicators. The CMP presented major content of P, K, Ca and Mg and better pH than the other systems due to the application of inorganic fertilizers, but its low % of N indicates important losses of this nutrient. In the FA, BL, CL and MC there was a deficiency of P and K. The FA and CL presented major % of organic matter (OM), C in different aggregates and OM fractions, and % of N. The porosity and aeration conditions were better in the FA and CL because they presented lowest bulk density and major % of 8 – 2 mm aggregates than the other systems. Microbial biomass, microorganism populations in general and earthworm populations were highest in the FA, CL and BL; there were no clear differences with the nematode populations. The indicators of microbial activity (microbial respiration, metabolic quotient, C mineralization index, catalasa activity) were generally more stable in the FA, BL, CL and MC. Whereas in CMP, in the rainy season, an evident imbalance was noted, induced by the application of synthetic fertilizers and pesticides. It can be deduced that these synthetic agricultural supplies can increase microbial activity but they are hazardous to the microbial biomass, this leads to "microorganism stress". The major weight soil quality indicators which are recommended for future research are: microbial respiration, microbial biomass, earthworms, micoparasites, actinomycetes, phytoparasitic nematodes, pH, total C, total N, K, bulk density and % of aggregates.

Key words: agroforestry systems, indicators, organic matter, microbial activity, soil quality index.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Precipitación mensual promedio (mm) en el valle de Talamanca, Costa Rica ……...4

Cuadro 2. Sistemas (usos de la tierra) seleccionados para analizar la calidad de suelos en el valle de Talamanca, Costa Rica …..……...5

Cuadro 3. Indicadores químicos, físicos y biológicos utilizados para determinar la calidad de suelos en 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica ……...8

Cuadro 4. Contrastes ortogonales para comparar 5 sistemas en el valle de Talamanca, Costa Rica..11

Cuadro 5. Características de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica ……..12

Cuadro 6. Agroquímicos sintéticos más utilizados en el manejo de platanales monocultivos convencionales del valle de Talamanca, Costa Rica …….13

Cuadro 7. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores químicos de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca ...…….14

Cuadro 8. Valores de p de los indicadores químicos para los contrastes ortogonales y otras comparaciones con prueba "t" entre los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica……..…15

Cuadro 9. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores físicos de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica …….16

Cuadro 10. Valores de p de los indicadores físicos para los contrastes ortogonales y otras comparaciones con prueba "t" entre los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica……..16

Cuadro 11. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores biológicos de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica…….19

Cuadro 12. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores biológicos de suelos de las dos épocas evaluadas en el valle de Talamanca, Costa Rica……..……..19

Cuadro 13. Valores de p de los indicadores biológicos para los contrastes ortogonales y otras comparaciones entre los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica……21

Cuadro 14. Medias de frecuencia absoluta y relativa (de las dos 2 épocas) de géneros de nemátodos identificados en los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica…….…….22

Cuadro 15. Frecuencia relativa de géneros de hongos identificados en los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica……..……....23

Cuadro 16. Análisis multivariado de la varianza con los 32 indicadores de mayor peso para los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca …….25

Cuadro 17. Análisis multivariado de la varianza con los 32 indicadores de mayor peso para los 3 conglomerados formados ……...……25

Cuadro 18. Índice de calidad de suelos aditivo (ICSA) para los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica ……...27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Figura 1. Mapa de ubicación de las 33 parcelas de estudio (sistemas) evaluadas en el valle de Talamanca, Costa Rica……...……..6

Figura 2. Puntos de muestreo en: A) sistemas agroforestales de cacao y banano; y, B) Platanales y barbecho……...8

Figura 3. A) Porcentaje de agregación; y, B) C en agregados de los suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica…….……17

Figura 4. A) Porcentaje de suelo en fracciones fina y gruesa; y, B) C en dos fracciones de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica (método fraccionamiento de materia orgánica)……..17

Figura 5. Medias para la interacción sistema y época en el valle de Talamanca: A) Respiración microbiana; B) Cociente metabólico; C) Índice de mineralización del C; D) Catalasa; E) Hongos; F) Actinomicetes; y, G) Nemátodos fitopatógenos…….20

Figura 6. Dendrograma de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica..……24

Figura 7. Biplot de análisis de componentes principales de todos los indicadores y los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica…….26

CALIDAD DE SUELOS EN PLANTACIONES DE CACAO (*Theobroma cacao*), BANANO (*Musa* AAA) Y PLÁTANO (*Musa* AAB) EN EL VALLE DE TALAMANCA, COSTA RICA

1. INTRODUCCIÓN

En la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica, una de las principales actividades económicas es la agricultura. Los cultivos principales son los granos básicos: arroz, maíz y frijol que predominan en las laderas y son para el autoconsumo familiar; y los cultivos comerciales: el cacao, el plátano y el banano orgánico que predominan en el valle de Talamanca (Vargas 1990, Borge y Castillo 1997, Whelan 2005). El cacao y el banano en la mayoría de los casos están en sistemas agroforestales, con poco o ningún uso de agroquímicos (Guiracocha *et al.* 2001, Somarriba y Harvey 2003), siendo importante el número de agricultores que manejan cacaotales y bananales orgánicos (Hinojosa *et al.* 2003, Whelan 2005). En cambio, los platanales, en la mayoría de los casos son monocultivos, con prácticas culturales frecuentes y con uso de agroquímicos (Cañizares 2003).

En el valle de Talamanca, los sistemas agroforestales de cacao y banano son fuente importante de ingresos económicos y proveen frutas, madera, leña y otros beneficios y servicios a los pequeños productores (Somarriba 2004). Sin embargo, en los últimos años, muchos productores han sustituido plantaciones de cacao y banano por plátano en monocultivo convencional, por los buenos precios que tiene este producto en el mercado nacional e internacional (Borge y Villalobos 1998, Whelan 2005). Este cambio de uso de la tierra y en el manejo de los sistemas puede tener un impacto negativo en el suelo, comprometiendo la sostenibilidad de los agroecosistemas.

El recurso suelo es fundamental para la sostenibilidad de los agroecosistemas porque cumple tres funciones esenciales: actúa como medio para el crecimiento de plantas y desarrollo de la actividad biológica, regula la reserva y flujo de agua, y degrada compuestos contaminantes para el ambiente (Larson y Pearce 1994). El concepto de calidad de suelos se define con base en las diferentes facetas de esas tres funciones del suelo como: la capacidad del suelo para funcionar en un ecosistema, para mantener y mejorar la productividad biológica, la calidad ambiental y la salud de plantas y animales (Doran y Parkin 1994, Doran *et al.* 1996).

Además del término “calidad de suelos” también está el término “salud de suelos”, varios autores han optado por utilizarlos como sinónimos porque incluyen los mismos componentes: productividad, ambiente y salud (Acton y Gregorich 1995, Doran y Jones 1996). En este trabajo se

utiliza el término “calidad de suelos” porque se asocia más con la capacidad productiva de un suelo para un uso específico (Doran y Zeiss 2000) y describe características físicas, químicas y biológicas (Doran *et al.* 1996).

El análisis de la calidad de suelos permite detectar cambios en el suelo, especialmente en la parte biológica, provee los aspectos básicos para evaluar la sostenibilidad del manejo del sistema y tiene relación directa con la producción sostenible; por tales razones, la calidad del suelo es el indicador primario del manejo sostenible de suelos y se considera un componente crítico de la agricultura sostenible (Doran y Parkin 1994, Larson y Pearce 1994, Karlen *et al.* 1997, Herrick 2000).

Para determinar la calidad de suelos es necesario usar tres tipos de indicadores: físicos, químicos y biológicos; todos son importantes para analizar en forma conjunta las características y funciones de un suelo. Los indicadores físicos y químicos se consideran relativamente estables, ya que los cambios en un sistema tardan en modificar apreciablemente ese tipo de propiedades y por tal razón no justifica medirlos en intervalos cortos; en cambio, los indicadores biológicos son más sensibles y por eso se consideran los primeros y mejores para detectar cambios rápidos en un suelo (García y Hernández 2003). Es importante evaluar el estado actual de todos esos indicadores y compararlos con valores conocidos o deseados (Karlen *et al.* 1997). Además, es necesario caracterizar los sistemas para analizar las influencias que el manejo y componentes de los mismos pueden tener en el suelo; las prácticas culturales pueden afectar significativamente la calidad de suelos al cambiar los parámetros físicos, químicos y biológicos (Fauci y Dick 1994a).

Existen diferentes criterios para elegir los indicadores de calidad de suelos más adecuados. En general, se deben seguir 5 criterios: que los indicadores sean sensitivos a variaciones en el manejo, que estén correlacionados con las funciones del suelo, que sean útiles para esclarecer procesos del agroecosistema, que sean útiles y comprensibles para los que manejan el suelo, y que sean fáciles y accesibles de medir (Doran y Zeiss 2000). También hay que considerar que se pueden usar indicadores que no sean tan precisos pero que la información que proporcionen sea generalizable y pueda ser extrapolada a diferentes escalas o regiones (Karlen *et al.* 1997).

Para comparar la calidad de suelos entre agroecosistemas se utilizan índices de calidad de suelos, que combinan los diferentes tipos de indicadores. Uno de los índices que puede ser usado para comparar calidad de suelos es el “índice de calidad de suelos aditivo” (ICSA), éste es básicamente una sumatoria de todos los índices (con valores entre 0-1) obtenidos de todos los indicadores

medidos en un suelo; se considera que a mayor valor del ICSA mejor es la calidad de un suelo (Andrews *et al.* 2002).

En este estudio se analizó la calidad de suelos en sistemas agroforestales de cacao y banano, cacao monocultivo y en plátano monocultivo convencional mediante indicadores físicos, químicos y biológicos, tomando como control a sistemas de barbecho. Estudios en otras regiones del mundo han demostrado que los sistemas agroforestales reducen la pérdida de nutrientes y producen y reciclan más biomasa que la mayoría de otros agroecosistemas, favoreciendo a la fertilidad y la biota del suelo (Schroth 2003); por otra parte, se considera que los sistemas de cultivo convencionales pueden tener efectos negativos en el suelo por la aplicación de insumos sintéticos. Por tanto, es importante analizar la calidad de suelos en todos estos sistemas de producción, con lo que también se podrán desarrollar recomendaciones que permitan mejorar el manejo y la sostenibilidad de los suelos y los cultivos en que se basan las economías de los hogares dedicados a la agricultura en Talamanca.

1.1 Objetivo general

Comparar la calidad de suelos en plantaciones de cacao, banano y plátano en el valle de Talamanca, Costa Rica.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los sistemas de producción de cacao, banano y plátano.
- Evaluar indicadores físicos y químicos de suelos en plantaciones de cacao, banano y plátano.
- Evaluar indicadores biológicos de suelos en plantaciones de cacao, banano y plátano en dos épocas del año: seca y lluviosa.
- Identificar los indicadores de mayor peso para determinar y comparar la calidad de suelos entre los sistemas evaluados.
- Calcular el índice de calidad de suelos aditivo para los sistemas evaluados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el valle de la Reserva Indígena de Talamanca, Cantón Talamanca, Provincia Limón, Costa Rica. Este paisaje está constituido por la coalescencia de abanicos aluviales formados por los ríos Telire, Coen, Larí, Urén y Yorkín, con una extensión aproximada de 12.000 ha representa el 18% del área total de la Reserva Indígena (Borge y Castillo 1997). Se ubica entre 9º00´-9º50´ latitud Norte y 82º35´-83º05´ longitud Oeste, con una altitud hasta los 200 m sobre el nivel del mar donde predominan las zonas de vida Bosque húmedo tropical y Bosque muy húmedo tropical, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Vargas 1990).

Clima. La precipitación anual está alrededor de 2500 mm, se considera una zona lluviosa todo el año (Kapp 1989). Sin embargo, de acuerdo con datos de Kapp (1989), Borge y Castillo (1997), y Mena (2001), se puede definir dos periodos relativamente secos: febrero-marzo y septiembre-octubre; y dos meses más lluviosos: julio y diciembre (Cuadro 1). La temperatura media anual oscila entre 24-27ºC (Kapp 1989, Mena 2001) y la humedad relativa anual es de 84-90% (Mena 2001).

Cuadro 1. Precipitación mensual promedio (mm) en el valle de Talamanca, Costa Rica

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	Lugar	Años de datos	Fuente (modificada)
173	153	16	295	212	195	233	240	182	155	181	276	2458	Sixaola	1979-1986	Kapp (1989)
150	120	130	175	300	240	290	260	220	340	290	200	2715	Chase	1986-1993	Borge y Castillo (1997)
170	130	150	175	285	310	240	290	240	260	210	240	2700	Amubri	1986-1993	Borge y Castillo (1997)

Suelos. Los suelos son derivados de depósitos aluviales compuestos por rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas erosionadas de la Cordillera de Talamanca; el relieve tiene una topografía plano cóncava y plano ondulada con pendientes inferiores al 13% (Borge y Castillo 1997). Predominan los suelos *Typic Tropaquepts* (Inceptisoles) (50%) y *Aeric Tropic Fluvaquents* (Entisoles) (30%) (Kapp 1989, con la descripción de Knox y Pérez 1978). En general, estos suelos se caracterizan por su poco desarrollo pedogenético, poca profundidad efectiva, texturas medias a gruesas, con gravas y piedras, bajo contenido de bases, drenaje moderado a pobre y riesgo de inundación; a pesar de estas limitaciones, son considerados suelos moderadamente fértiles y los mejores de la Reserva Indígena de Talamanca (Borge y Castillo 1997).

2.2 Selección de sistemas (tratamientos) y parcelas de estudio

Los principales cultivos en el valle de Talamanca son el cacao, plátano y banano (Kapp 1989, Borge y Castillo 1997); con base en esto y en las formas más frecuentes en que son cultivados, se analizó la calidad de suelos en 5 sistemas (tratamientos) con 5 a 7 repeticiones (fincas) (Cuadro 2). Las fincas posibles donde establecer parcelas de estudio se identificaron usando las bases de datos de proyectos que trabajaron en la zona, recorriendo y visitando las fincas. De todas las fincas de interés visitadas se escogieron aquellas que tenían sistemas que cumplían con los siguientes criterios:

- Cacaotales híbridos, adultos y en producción sin árboles de sombra
- Sistemas agroforestales de cacao híbrido, adultos y en producción, con laurel (*Cordia alliodora*)
- Sistemas agroforestales de banano de 3 años de edad o más, con laurel
- Platanales de 3 años de edad o más, sin árboles de sombra y con uso de agroquímicos
- Cultivos principales con distancia de siembra similar
- El mismo orden de suelo (inceptisoles)

Cuadro 2. Sistemas (usos de la tierra) seleccionados para analizar la calidad de suelos en el valle de Talamanca, Costa Rica

Sistema (abreviado)	Sistema (uso de la tierra)	Tipo	Repeticiones (fincas)
CM	Cacao	Monocultivo	5
PMC	Plátano	Monocultivo convencional	7
CL	Cacao-laurel	Agroforestal con 1 estrato de sombra	7
BL	Banano-laurel	Agroforestal con 1 estrato de sombra	7
BARB	Barbecho (control)	Bosque secundario joven	7
		Total de parcelas de estudio = 33	

En cada finca, dentro del sistema seleccionado, se marcó una parcela de estudio de 20 x 50 m (1000 m^2), en la que se hicieron los muestreos de suelo y otras evaluaciones. Cada parcela de estudio se ubicó en un lugar representativo de las condiciones predominantes de producción del sistema. En las esquinas de cada parcela de estudio se marcaron con cinta roja los árboles (o estacas) y se registraron las coordenadas (GPS) para facilitar la ubicación posterior. Con las coordenadas se elaboró un mapa de ubicación de las 33 parcelas de estudio (sistemas) evaluadas (Figura 1).

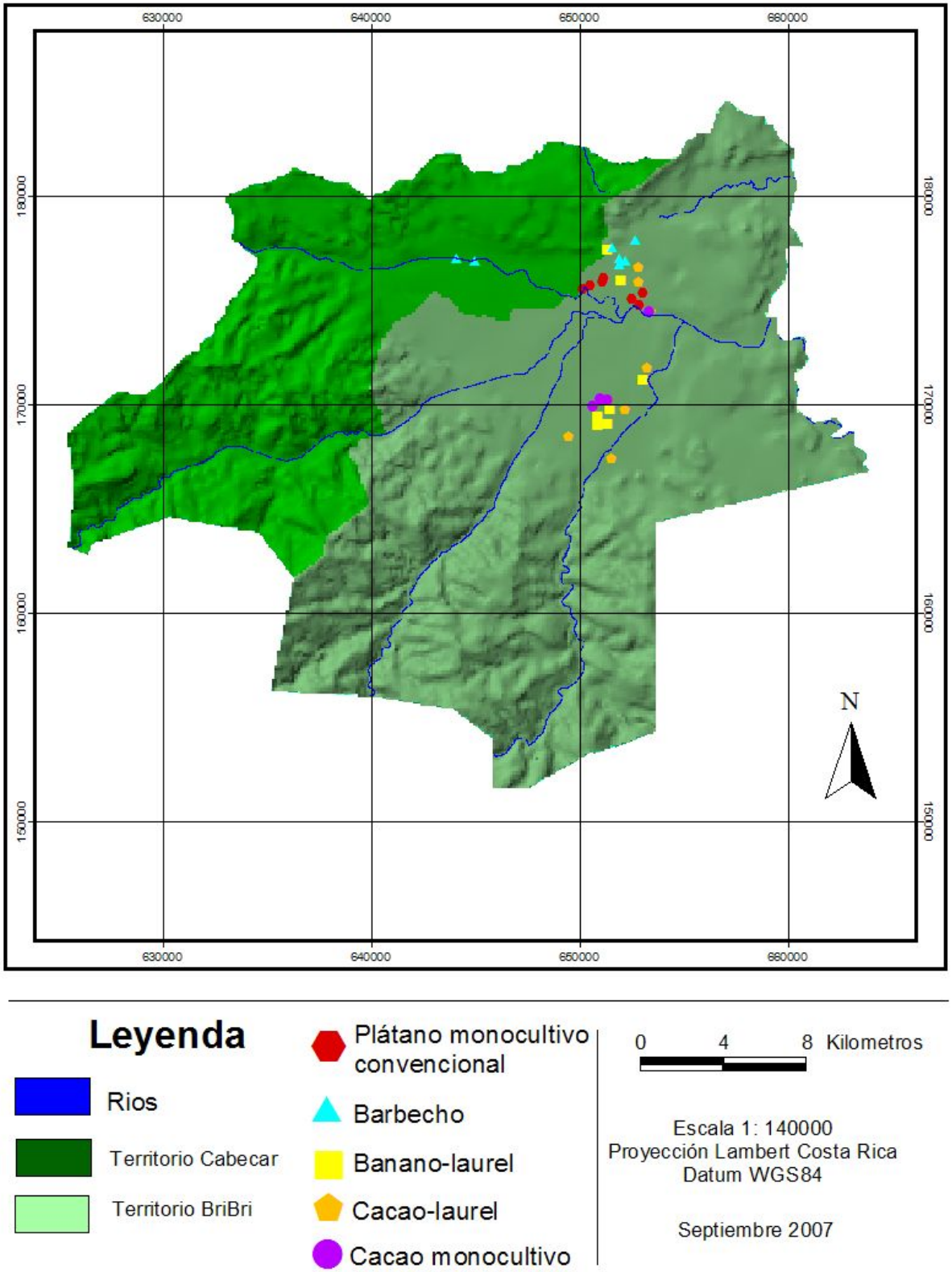


Figura 1. Mapa de ubicación de las 33 parcelas de estudio (sistemas) evaluadas en el valle de Talamanca, Costa Rica.

2.3 Caracterización de los sistemas seleccionados

A través de una encuesta a los productores se recolectó información general sobre el historial de la finca, manejo, frecuencia de prácticas de cultivo, insumos utilizados, rendimientos, problemas del cultivo y otros (Anexo 1). Aparte, se determinó la densidad de plantación contando las plantas existentes en 10 m^2 y se identificaron y contaron los árboles de laurel y otros árboles que formaban parte del sistema, todo dentro de la parcela de estudio.

2.4 Indicadores de calidad de suelos seleccionados y épocas de muestreo

El análisis de la calidad de suelos de los 5 sistemas se hizo con base en la medición de indicadores físicos, químicos y biológicos (variables de respuesta) (Cuadro 3). Los indicadores biológicos se evaluaron en época seca (marzo 2007) y lluviosa (junio 2007) por ser sensibles a cambios de corto plazo en el suelo, mientras que los indicadores químicos y físicos se evaluaron una sola vez (marzo 2007) por ser relativamente estables (García y Hernández 2003) y por tal razón no justificaba determinarlos en las dos épocas.

2.5 Muestreo de suelos, lombrices, densidad aparente y hojarasca

En cada parcela de estudio se colectaron 12 submuestras de suelo para obtener una muestra compuesta de 500 g (Henríquez y Cabalceta 1999). Las profundidades de muestreo fueron de 0-20 cm ó de 0-5 cm, dependiendo del indicador (Cuadro 3). En los sistemas agroforestales se tomaron cuatro submuestras a un metro del tronco de laureles, otras cuatro en medio de dos laureles y otras cuatro a un metro del tronco de árboles de cacao o de plantas de banano (Figura 2A). En los monocultivos y barbechos se hizo un recorrido en zig-zag para tomar las 12 submuestras y así abarcar toda el área (Bertsch 1995) (Figura 2B). La muestra de suelos compuesta fue colocada en bolsa plástica y rotulada con el respectivo código; no se cerró la bolsa hasta que el suelo se secó al aire para evitar cambios bioquímicos que alteren las características de la muestra (Bertsch 1995).

Para recuento de lombrices, muestreo para densidad aparente y recolección de hojarasca en los sistemas agroforestales se ubicaron tres puntos (sitios): uno en medio de dos laureles, otro cerca (1 m) de un cacao o de una planta de banano y otra cerca de un laurel. En las parcelas sin sombra y barbechos los tres puntos se tomaron al azar. Para calcular los resultados se promediaron los valores de los 3 sitios.

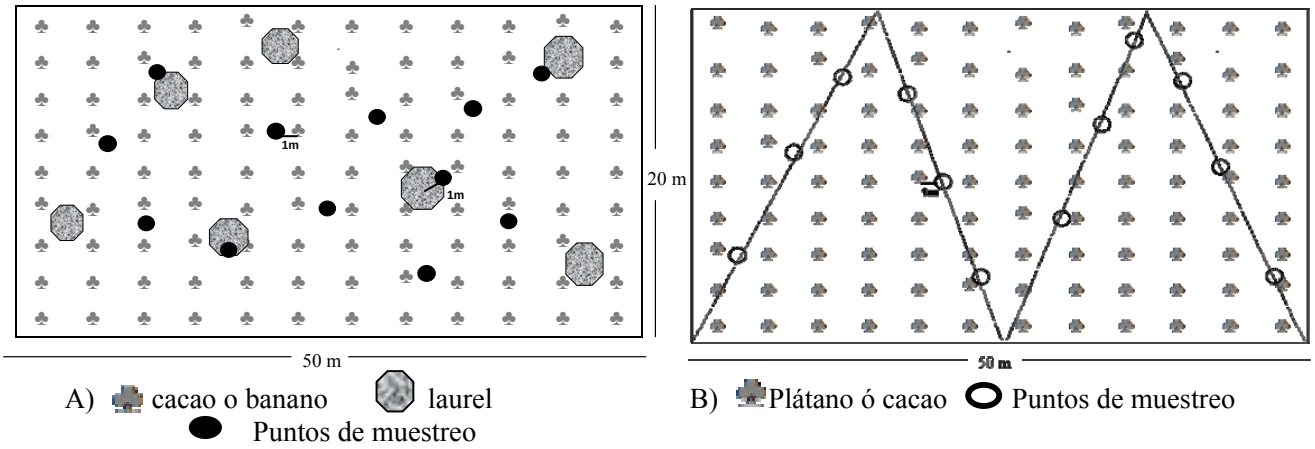


Figura 2. Puntos de muestreo en: A) sistemas agroforestales de cacao y banano; y, B) Plátano ó cacao monocultivo y barbecho.

Cuadro 3. Indicadores químicos, físicos y biológicos utilizados para determinar la calidad de suelos en 5 sistemas en el valle de Talamanca, Costa Rica

	INDICADORES	Prof (cm)	METODOLOGÍA	FUENTE
QUÍMICOS	pH Acidez (cmol(+) l^{-1}) Ca (cmol(+) l^{-1}) Mg (cmol(+) l^{-1}) P (mg l^{-1}) K (mg l^{-1}) Cu (mg l^{-1}) Mn (mg l^{-1}) Zn (mg l^{-1}) Fe (mg l^{-1})	0-20 0-20	ph-metro en agua[1] Extracción de P, K, Cu, Mn, Zn con el método Olsen modificado; para Ca, Mg y acidez extraíble con KCl 1 N. La lectura de P con el método colorimétrico la determinación de los demás elementos (K, Cu, Mn, Zn, Ca y Mg) mediante espectroscopia por absorción atómica; para determinar la acidez extraíble mediante titulación con solución estandarizada de NaOH 0.01 N	- Díaz Romeu y Hunter (1978) **(2)**
	% C total* % C total % N total	0-5 0-20 0-20	El C total y N total se determinaron con el método de combustión en equipo autoanalizador[1]	Briceño y Pacheco (1984) **(2)**
	% Materia orgánica (MO) % Materia orgánica (MO)	0-5 0-20	% materia orgánica = % C x 1,724	Bertsch (1995)
	C/N	0-20	C/N = % C total / % N total	(Bertsch 1995)
	Fraccionamiento de la MO: • % FF (<53 µm) • % FG (>53 µm) • g C FF 100 g^{-1} • g C FG 100 g^{-1}	0-5	Separación de la MO en fracción fina (FF; (<53 µm) y fracción gruesa (FG; >53 µm) y se determina el C en cada una de las fracciones. Los resultados se expresaron en gramos de C por cada 100 g de suelo[1]	Cambardella y Elliott (1992) **(3)**
	C en los agregados: • g C 8-2 mm 100 g^{-1} • g C 2 mm-250µm 100 g^{-1} • g C 250-53 µm 100 g^{-1} • g C < 53 µm 100 g^{-1}	0-5	Se determinó el C en cada uno de los agregados (indicadores físicos), se hizo con el método de combustión en equipo autoanalizador. Los resultados se expresaron en gramos de C por cada 100 g de suelo[1]	Briceño y Pacheco (1984)

	INDICADORES	Prof (cm)	METODOLOGÍA UTILIZADA	FUENTE
FÍSICOS	Densidad aparente (DA) ($g\ cc^{-1}$)	0-5	Extracción de suelo con cilindros de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro en tres sitios. Secado en horno a 105ºC por 24 horas[1]	Henríquez y Cabalceta (1999) **(4)**
	% de agregación del suelo: • % 8-2 mm • % 2 mm-250µm • % 250-53 µm • % < 53 µm	0-5	Separación de agregados mediante cribado en húmedo, secado en horno a 65ºC por 5 días[1]	Elliot (1986) **(5)**
	Textura % Arcilla % Arena % Limo	0-20	Método granulométrico de Bouyoucos[1]	-
BIOLÓGICOS	UFC actinomicetes g^{-1} UFC bacterias g^{-1} UFC hongos g^{-1}	0-5	Se utilizó el método de determinación de poblaciones de microorganismos del suelo mediante técnicas de recuento[2]	Weaver *et al.* (1994) **(6)**
	Nemátodos saprofitos 100 cc^{-1} Nemátodos fitopatógenos 100 cc^{-1}	0-5	Extracción de nemátodos con tamizado y centrifugado con solución azucarada[3]	-
	% de Micoparásitos % de *Trichoderma* % de *Clonostachys*	0-5	Se determinó el % de micoparásitos sobre cuatro cepas de hongos fitopatógenos usados como cebos[4]	Foley y Deacon (1985) George (2006) **(7)**
	Índices de Shannon (H) para nemátodos fitopatógenos	-	$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i$	Somarriba (1999)
	Respiración microbiana ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ h^{-1}$)	0-5	Producción de CO_2 en envases herméticos incubados a 25ºC por 24 horas[1]	Zibilske (1994) **(8)**
	Biomasa microbiana (mg C-biom kg^{-1})	0-5	Fumigación-incubación. determinación de C microbiano con equipo autoanalizador antes y después de la incubación[1]	Anderson e Ingram (1993) **(9)**
	Índice de mineralización del C (% C 10 $días^{-1}$)	-	IM = (CO_2-C/C-total) x 100% CO_2-C : respiración microbiana.	Stanford y Smith (1972)
	Cociente metabólico ($\mu g\ CO_2\text{-}C\ mg^{-1}$ C-biom h^{-1})	-	$qCO_2\text{-}C = CO_2\text{-}C$ /C-biom h^{-1} CO_2-C: respiración microbiana	Visser y Parkinson (1993)
	Catalasa ($mmol\ H_2O_2\ g^{-1}\ h^{-1}$)	0-5	Metodología que mide el consumo de H_2O_2[5]	Trasar *et al.* (2003) **(10)**
	Lombrices pequeñas $(m^2)^{-1}$ Lombrices medianas $(m^2)^{-1}$ Lombrices grandes $(m^2)^{-1}$ Total de lombrices $(m^2)^{-1}$	0-10	Recuento de lombrices de tres tamaños: pequeñas (0-3 cm), medianas (3-6 cm) y grandes (>6 cm), en bloques de suelo de 50 x 50 cm y 10 cm de profundidad en tres sitios	**(11)**
	Biomasa de hojarasca ($kg\ ha^{-1}$ seca)	-	Recolección de hojarasca en sitios de 50 x 50 cm en tres sitios. Secada a 65ºC por 48 horas	Porras (2006) **(12)**

*Valor que se utiliza para el cálculo del índice de mineralización. Prof : profundidad a la que se muestreo el suelo para el respectivo análisis. UFC: unidades formadoras de colonias.

Analizados en: [1]Laboratorio de suelos del Centro Agronómico Tropical de Investigación de Investigación y Enseñanza (CATIE); [2]Laboratorio de microbiología de la Universidad de Costa Rica (UCR) sede Turrialba; [3]Laboratorio de nematología de la UCR-San José; [4]Laboratorio de fitoprotección del CATIE; [5]Laboratorio de bioquímica el Centro de Investigaciones Agronómicas-San José (CIA-UCR).

Números entre paréntesis y con negrilla **()** indican el número de anexo donde se encuentran mayores detalles de las metodologías.

2.6 Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA)

Se calculó este índice con la metodología propuesta por Andrews *et al.* (2002). Se clasificaron los indicadores en dos grupos. Los indicadores cuyos valores altos son considerados como "buenos" constituyeron el grupo **"mayor es mejor"** y los indicadores cuyos valores menores son considerados como "buenos" constituyeron el grupo **"menor es mejor"**. Para cada indicador de cada parcela de estudio se calculó un índice de calidad de suelo (ICS) mediante fórmulas que hacen que el resultado tenga un valor de 0-1, y al final se calculó el ICSA para cada parcela de estudio (sistema), se presentan las formulas a continuación:

- **Para los indicadores del grupo "mayor es mejor":**

  ICS = valor de cada indicador / valor más alto del indicador

- **Para los indicadores de "menor es mejor":**

  ICS = valor más bajo del indicador/ valor de cada indicador

Finalmente, El **ICSA** para cada parcela de estudio (sistema) fue la **sumatoria de los ICS** de todos sus indicadores. Se supone que mientras más alto es el valor del **ICSA** mejor es la calidad de suelo del sistema de uso de la tierra.

2.7 Métodos estadísticos

2.7.1 Diseños y modelos

Para los indicadores físicos y químicos se utilizó un diseño completo al azar (DCA), con 5 tratamientos (sistemas) con 5-7 repeticiones (Cuadro 2). El modelo fue el siguiente:

$$\mathbf{Y_{ij} = \mu + S_i + \epsilon_{ij}}$$

Donde: Y_{ij} = una observación cualquiera; μ = media; S_i = efecto del i-ésimo sistema; ϵ_{ij} = error debido a sistema

Para los indicadores biológicos se utilizó un DCA bifactorial con 5 tratamientos (sistemas) y 2 épocas (seca y lluviosa), con 5-7 repeticiones (Cuadro 2) y en parcelas divididas. Se considera parcelas divididas porque la parcela grande es el sistema y la subparcela es la medición en cada época. El modelo fue el siguiente:

$$\mathbf{Y_{ijk} = \mu + S_i + \epsilon_i + E_j + SE_{ij} + \epsilon_{k(ij)}}$$

Donde: Y_{ijk} = una observación cualquiera; μ = media; S_i = efecto del i-ésimo sistema; ϵ_i = error debido a sistema; E_j = efecto de la j-ésima época; SE_{ij} = interacción sistema x época; $\epsilon_{k(ij)}$ = error debido a la época

2.7.2 Análisis univariado

Se hizo análisis de varianza (ANOVA) univariado y pruebas Diferencia Mínima Significativa (LSD Fisher) para los modelos propuestos con un nivel de confianza de 95%; los resultados de variables con interacción entre sistema y época se presentaron en figuras. Se hicieron también contrastes ortogonales (Cuadro 4). Se hicieron también pruebas t Student para comparar: 1) CL y BL vs BARB; y, 2) CL y BL vs PMC

Cuadro 4. Contrastes ortogonales para comparar 5 sistemas en el valle de Talamanca, Costa Rica

Contrastes ortogonales	Barbecho (BARB)	Banano-laurel (BL)	Cacao-laurel (CL)	Cacao mono_ cultivo(CM)	Plátano monocultivo convencional (PMC)
BARB vs resto	4	-1	-1	-1	-1
PMC vs BL CL CM	0	-1	-1	-1	3
BL CL vs CM	0	1	1	-2	0
CL vs BL	0	-1	1	0	0

2.7.3 Análisis multivariado

- Análisis de conglomerados: para determinar cuales sistemas se agrupan en los mismos conglomerados de acuerdo a la similaridad que pueden tener en sus características de suelo, se hizo con todos los indicadores de calidad de suelos evaluados
- Análisis discriminante canónico: para identificar los indicadores de calidad de suelos con más poder (de mayor peso) para separar sistemas y conglomerados, es decir, los más útiles
- Análisis de varianza multivariado (MANOVA) para sistemas y conglomerados: para determinar si difieren significativamente entre sí o son iguales. Se hizo tomando los indicadores de mayor peso, seleccionados de acuerdo a análisis discriminante y análisis univariado (aquellos que presentaron más diferencias entre sistemas se consideraron como los de más peso)
- Análisis de componentes principales (biplot): para determinar las correlaciones entres los indicadores de calidad de suelos y cuáles sistemas son más parecidos por cercanía en el biplot. Se hizo con todos los indicadores

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de los sistemas

El sistema cacao-laurel (CL) y cacao monocultivo (CM) son similares en sus características, ambos se diferencian del banano-laurel (BL) y plátano monocultivo convencional (PMC), las diferencias más importantes para fines de este estudio están en las prácticas de manejo que son más frecuentes e incluyen aplicación de insumos en PMC (Cuadro 5). Los sistemas de CL y BL pueden considerarse orgánicos pues no reciben aplicación de insumos sintéticos y tienen también, aunque pocos, otros árboles de sombra (Cuadro 5) que diversifican el sistema. Varias de las parcelas de CL y BL seleccionadas para este estudio contaban con la certificación orgánica.

Cuadro 5. Características de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

	---------- SISTEMAS ----------			
Características	**Cacao-laurel**	**Cacao monocultivo**	**Banano-laurel**	**Plátano monocultivo convencional**
Área que ocupan (ha)	0,5 a 2	0,5	0,25 a 1	1 a 6
Edad promedio (años)	20	20	9	9
Material	Híbrido	Híbrido	Cavendish Gros Michel	Curraré
Densidad ha^{-1}	500 – 650	450 – 650	600 – 800	1900
Laureles ha^{-1}	80 – 130	----------	90-110	----------
Otras especies leñosas encontradas pero en pocas cantidades	*Gliricidia sepium* *Cedrella odorata* *Inga spp.* *Cupania cinerea* *Bactris gasipaes* *Spondias bombin* *Persea spp.*	----------	*Bactris gasipaes* *Inga spp.* *Cedrela odorata* *Diphysa americana*	----------
Principales problemas	Monilia Mazorca negra podas	Monilia Mazorca negra podas	Sigatoka negra Precio del banano	Sigatoka negra Nemátodos Picudo
Prácticas de cultivo	Poda (c/año) Chapeas (c/3meses)	Poda (c/año) Chapeas (c/3meses)	Deshoja Chapea (c/3meses)	Deshoja (c/15 días) Deshija (c/2 meses) Chapea (c/4meses)
Cosechas	2 por año (oct-nov; jun-jul)	2 por año (oct-nov; jun-jul)	Cada 22 días	Cada 7 días
Fertilización	----------	----------	----------	Fórmula completa, Urea azufrada, Nutran
Herbicidas	----------	----------	----------	Gramoxone (i.a. Paraquat) Roundup (i.a. Glifosato)
Nematicidas	----------	----------	----------	Vydate (i.a. Oxamil) Counter (i.a. Terbufos)
Fungicidas	----------	----------	----------	Tilt (i.a. Propiconazole)
Rendimiento ha^{-1} $año^{-1}$	200 kg cacao seco	160 kg cacao seco	5000 kg	27000 kg (1800 racimos)

c/: cada; i.a.: ingrediente activo

De los sistemas de producción más importantes en el valle de Talamanca el PMC es el único sistema donde se aplican agroquímicos sintéticos como herbicidas, fertilizantes, fungicidas, insecticidas y nematicidas con diferentes frecuencias y dosis (Cuadro 6).

Cuadro 6. Agroquímicos sintéticos más utilizados en el manejo de platanales monocultivos convencionales del valle de Talamanca, Costa Rica

Práctica	Insumos	Dosis producto comercial	Frecuencia de aplicación
Control de malezas	Gramoxone (i.a. Paraquat)	1 l ha^{-1}	Cada tres meses
	Roundup (i.a. Glifosato)	1 l ha^{-1}	
*Fertilización	Formula completa	100-150 kg ha^{-1}	Dos a tres veces por año
	Urea azufrada	100-150 kg ha^{-1}	
	Nutran	100-150 kg ha^{-1}	
Control Sigatoka negra	Tilt (Propiconazole)	0,5 l ha^{-1}	Cada 2 o 3 meses
Control nemátodos y picudo	Vydate (i.a. Oxamil)	14 oz ha^{-1}	Una o dos veces por año
	Counter (i.a. Terbufos)	20 kg ha^{-1}	

* La mayoría de productores rota los fertilizantes, en cada aplicación se aplica uno de los productos; algunos mezclan todos los fertilizantes hasta tener los 100-150 kg ha^{-1}. i.a.: ingrediente activo.

En cuanto a los barbechos, en el valle de Talamanca la mayoría de las fincas están ocupadas por cultivos y ya no tienen áreas con bosques, ó tienen áreas muy pequeñas inferiores a 0,1 ha. En el área de estudio no fue posible encontrar bosques, pero con esfuerzo se encontraron barbechos con áreas entre 0,5 y 2 ha, con edades entre 12-20 años, la edad promedio fue de 17 años. Antes de ser barbechos fueron cacaotales ó platanales ó potreros, en los cuales había poco manejo y no se aplicaba ningún tipo de insumos; se los abandonó por la baja productividad. En estos barbechos las especies más comunes son: laurel, pejiballe (*Bactris gasipaes*), jabillo (*Hura crepitans*) y palma (*Iriartea deltoidea*); se pueden encontrar alrededor de 500 de estos árboles ha^{-1}.

3.2 Indicadores químicos

Los suelos de PMC presentaron significativamente mayores valores de pH, P, K, Ca y Mg, y menores valores de acidez y Fe que los demás sistemas ($p<0,05$); mientras que en el BARB y CL se registraron mayores valores ($p<0,05$) de % N total, % C total, % materia orgánica y Mn que los demás sistemas, para el resto de indicadores químicos no hubo diferencias significativas (Cuadro 7). La mayoría de los indicadores químicos fueron diferentes ($p<0,05$) para los contrastes ortogonales de BARB vs. el resto de sistemas, PMC vs. CL BL CM y CL vs. BL; y con la prueba de "t" también se encontraron diferencias ($p<0,05$) entre CL y BL vs. BARB, y CL y BL vs. PMC para varios de estos indicadores (cuadro 8).

Cuadro 7. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores químicos de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca

INDICADORES	PMC	CM	BL	CL	BARB	Valor p ANOVA	†Ámbito óptimo
N total (%)	0,19±0,05 c	0,21±0,03 bc	0,19±0,03 c	0,27±0,09 ab	0,33±0,03 a	0,0003*	
C total (%)	1,65±0,40 c	1,89±0,39 bc	1,58±0,38 c	2,43±0,91 ab	2,92±0,30 a	0,0003*	
MO (%)	2,84±0,68 a	3,26±0,67 ab	2,73±0,65 a	4,20±1,56 bc	5,03±0,52 c	0,0003*	
C/N	8,79±0,47	9,11±0,68	8,25±0,91	9,07±0,52	8,96±0,42	0,135	10-12
pH	6,77±0,71 c	5,73±0,15 ab	5,92±0,20 b	5,33±0,49 ab	5,16±0,53 a	<0,0001*	5,6-6,5
Acidez (cmol(+) l^{-1})	0,05±0,01 b	0,17±0,13 ab	0,09±0,04 b	1,51±2,25 a	2,59±3,20 a	0,002*	0,5-1,5
K (cmol(+) l^{-1})	0,47±0,11 b	0,15±0,06 a	0,21±0,15 a	0,18±0,07 a	0,23±0,09 a	0,0001*	0,2-0,6
P (mg l^{-1})	10,61±3,5 c	6,12±2,77 ab	7,71±2,83 bc	4,41±2,67 ab	3,34±1,15 a	0,0004*	10-20
Ca (cmol(+) l^{-1})	25,24±2,3 b	8,26±2,47 a	12,69±7,64 a	7,06±3,02 a	11,39±9,7 a	0,002*	4-20
Mg (cmol(+) l^{-1})	6,39 ±1,6) b	2,97±2,66 a	3,73±2,35 a	3,12±2,14 a	2,77±1,41 a	0,024*	1-5
Cu (mg l^{-1})	8,91±2,92	6,14±1,73	6,27±1,89	7,17±2,82	9,30±2,56	0,103	2-20
Zn (mg l^{-1})	1,71±0,6 bc	1,24±1,31 c	0,89±0,52 c	2,71±1,92 b	9,20±7,90 a	0,0002*	2-10
Mn (mg l^{-1})	4,80±2,51 c	11,76±11,32 b	5,99±0,82 bc	38,74±33,21 a	49,23±24,7 a	<0,0001*	5-50
Fe (mg l^{-1})	47,86±13,1 a	118,80±36,3 b	102,80±44,1 b	180,0±108,7 b	149,1±99,2 b	0,0015*	10-100

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.
† Fuente: Bertsch (1995), por debajo de estos valores se consideran críticos. MO: materia orgánica.
*Indica diferencias significativas detectadas con el ANOVA ($p<0,05$).
Letras diferentes en filas indican diferencias significativas entre sistemas (Prueba LSD Fisher, $p<0,05$).
±: desviación estándar.

Cuadro 8. Valores de p de los indicadores químicos para los contrastes ortogonales y otras comparaciones con prueba "t" entre los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

	---------- Contrastes ortogonales ----------				----- Prueba "t" -----	
INDICADORES	**BARB vs. el resto**	**PMC vs. CL BL CM**	**CL BL vs. CM**	**CL vs. BL**	**CL BL vs. BARB**	**CL BL vs. PMC**
N total (%)	0,0001*	0,2279	0,4517	0,0168*	0,0007*	0,2722
C total (%)	0,0002*	0,1992	0,6902	0,0074*	0,0017*	0,292
MO (%)	0,0002*	0,1983	0,6898	0,0074*	0,0017*	0,2909
C/N	0,5849	0,9387	0,1958	0,0263*	0,4008	0,7212
pH	0,0011*	<0,0001*	0,7005	0,0369*	0,0637	0,0004*
Acidez (cmol(+) l^{-1})	0,0156*	0,0043*	0,5943	0,0271*	0,2334	0,0004*
K (cmol(+) l^{-1})	0,8853	<0,0001*	0,4036	0,7589	0,3817	0,0001*
P (mg l^{-1})	0,0032*	0,0011*	0,9699	0,0365*	0,0118*	0,0089*
Ca (cmol(+) l^{-1})	0,1752	0,0003*	0,6700	0,0693	0,7188	0,0003*
Mg (cmol(+) l^{-1})	0,2787	0,0032*	0,2212	0,5661	0,4855	0,0056*
Cu (mg l^{-1})	0,0579	0,0461*	0,6684	0,519	0,0392*	0,0893
Zn (mg l^{-1})	0,0001*	0,1532	0,2448	0,011*	0,0022*	0,2754
Mn (mg l^{-1})	<0,0001*	0,0029*	0,5701	0,0001*	0,0116*	0,0313*
Fe (mg l^{-1})	0,4748	0,0002*	0,9404	0,0742	0,7402	<0,0001*

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo. MO: materia orgánica. *Comparaciones con diferencias significativas (p<0,05).

3.3 Indicadores físicos

Todos los sistemas presentaron densidad aparente (DA) menor a 1 g cc^{-1}, pero en el BARB y CL se presentaron valores significativamente menores (p<0,05) a los otros sistemas; en la textura solo el BARB tuvo diferencias (p<0,05) de % de arcilla con los demás sistemas; la humedad de los suelos fue mayor en el BARB y PMC en la época seca (Cuadro 9). La DA fue diferente (p<0,05) en los contrastes ortogonales BARB vs. el resto de sistemas y PMC vs. CL BL CM, y en los sistemas agroforestales (CL y BL) vs. BARB (con prueba "t"); los % de arena y arcilla fueron diferentes para algunas comparaciones y la humedad en época seca fue diferente en todas las comparaciones que involucraban al BARB y PMC (Cuadro 10).

Cuadro 9. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores físicos de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

INDICADORES	PMC	CM	BL	CL	BARB	Valor p ANOVA
DA (g cc^{-1})	0,96±0,05c	0,90±0,06 bc	0,92±0,10 bc	0,83±0,09 ab	0,78±0,07 a	0,0024*
Arena (%)	31,26±19,34	47,20±11,52	42,40±12,94	44,11±9,20	33,83±4,40	0,1651
Limo (%)	46,06±13,44	38,00±8,79	41,83±12,33	34,06±7,43	32,11±6,91	0,1240
Arcilla (%)	22,69±7,56 a	14,80±7,33 a	15,77±2,69 a	21,83±9,13 a	34,06±5,68 b	0,0003*
Textura	F. limosa	Franco	Franco	F. arcillosa	F. arcillosa	-
Humedad época seca (%)	28,19±5,02 a	21,02±3,14 b	22,81±2,99 b	22,79±2,99 b	28,56±3,00 a	0,0012*
Humedad época lluviosa (%)	32,01±4,63	29,05±2,46	30,66±2,97	30,44±3,67	33,36±3,08	0,2741

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.
DA: densidad aparente. *Indica diferencias significativas detectadas con el ANOVA (p<0,05).
Letras diferentes en filas indican diferencias significativas (Prueba LSD Fisher, p<0,05).
±: desviación estándar.

Cuadro 10. Valores de p de los indicadores físicos para los contrastes ortogonales y otras comparaciones con prueba "t" entre los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

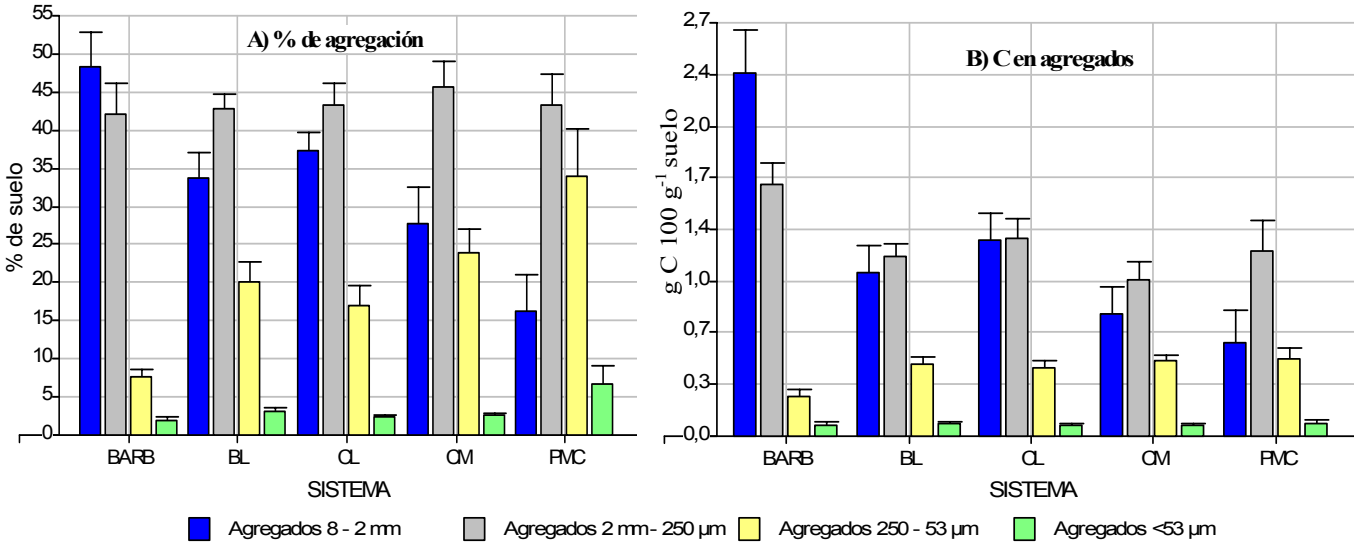
	---------- Contrastes ortogonales ----------				------ Prueba "t"------	
INDICADORES	BARB vs. el resto	PMC vs. CL BL CM	CL BL vs. CM	CL vs. BL	CL BL vs. BARB	CL BL vs. PMC
DA (g cc^{-1})	0,0013*	0,0451*	0,5504	0,067	0,0436*	0,0648
Arena (%)	0,1948	0,0294*	0,5674	0,8081	0,0133*	0,0928
Limo (%)	0,0945	0,0979	0,9919	0,1833	0,2195	0,1602
Arcilla (%)	<0,0001*	0,1087	0,2888	0,1217	0,0001*	0,2813
Textura	-	-	-	-	-	-
Humedad época seca (%)	0,0033*	0,0007*	0,3436	0,9881	0,0004*	0,0052*
Humedad época lluviosa (%)	0,0694	0,217	0,4168	0,9067	0,0706	0,4065

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo
DA: densidad aparente. *Comparaciones que presentaron diferencias significativas (p<0,05).

3.4 Porcentaje y contenido de C en agregados y fraccionamiento de la materia orgánica

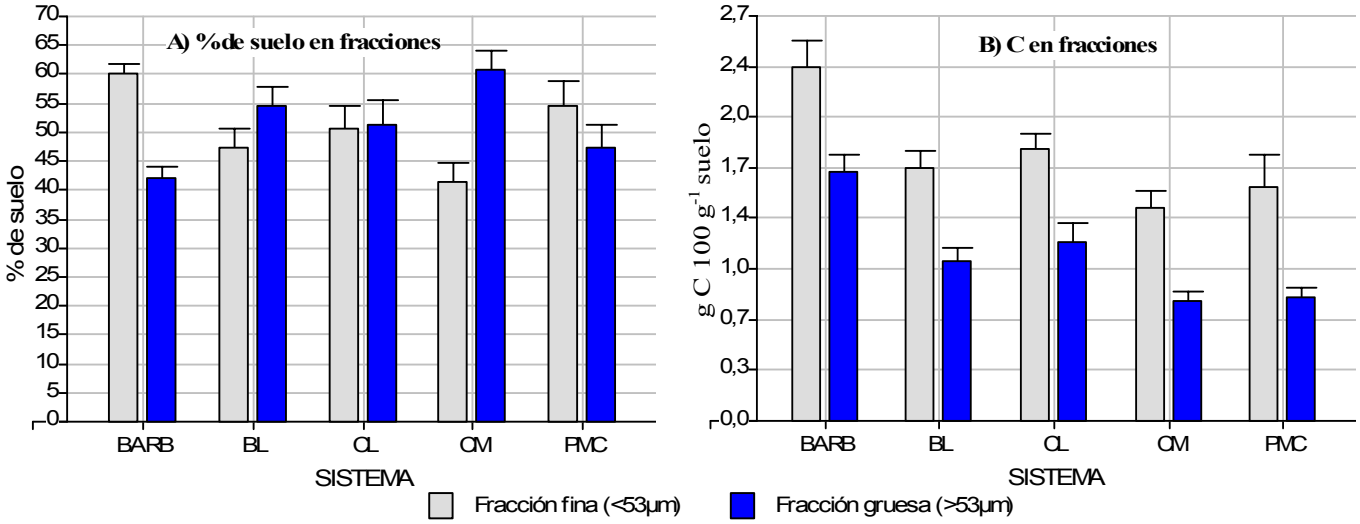
En cuanto a la estructura de suelos, en el BARB, CL y BL hubo mayor % de agregados de 8 – 2 mm y en el PMC hubo mayor % de agregados de 250 – 53 µm y <53 µm (Figura 3A). El mayor contenido (p<0,05) de C en los agregados de 8 – 2 mm se presentó en el BARB, seguido por el CL; el contenido de C en todos los demás tamaños de agregados fue similar estadísticamente en el CL, BL, CM y PMC; y en elPMC se registró más C en sus agregados de 2 mm – 250 µm (p<0,05) que en sus demás agregados (Figura 3B).

Con el fraccionamiento de materia orgánica el BARB y PMC presentaron mayor % de suelo en la fracción fina (FF: <53 µm) que en la fracción gruesa (FG: >53 µm); en el BL y CM fue lo contrario; y en el CL prácticamente ambas fracciones tuvieron igual % (Figura 4A). El mayor contenido de C en FF y en FG se presentó en el siguiente orden: BARB>CL>BL>PM>CM; sin embrago, solo en el C en FG se presentaron diferencias significativas ($p<0,05$) (Figura 4B).



BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo

Figura 3. A) Porcentaje de agregación; y, B) C en agregados de los suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica.



BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo

Figura 4. A) Porcentaje de suelo en fracciones fina y gruesa; y, B) C en dos fracciones de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica (método fraccionamiento de materia orgánica).

3.5 Indicadores biológicos

Para los indicadores biológicos que no presentaron interacción entre sistema y época los resultados se presentan en cuadros para sistema y para época por separado. Los indicadores que presentaron interacción entre sistema y época fueron 7: respiración microbiana, cociente metabólico, índice de mineralización del C, catalasa, hongos, actinomicetes y nemátodos fitopatógenos; éstos se presentan en figuras donde se pueden apreciar los resultados por sistema y época a la vez.

El BARB se diferenció ($p<0,05$) con la mayoría de los demás sistemas en lombrices medianas, grandes y en el total; el CL y BL no presentaron diferencias con el BARB en lombrices grandes (Cuadro 11). La menor población de bacterias se presentó en CM ($p<0,05$) y entre los demás sistemas no se presentaron diferencias para este indicador; el PMC fue el sistemas con la menor ($p<0,05$) presencia del total de micoparásitos y de *Trichoderma* (que apareció con más frecuencia); en la población de nemátodos saprofitos no hubo diferencias significativas entres los sistemas; el BARB y CL tuvieron la mayor biomasa microbiana y se diferenciaron del PMC que tuvo el menor valor ($p<0,05$); el BARB y CL también presentaron la mayor cantidad de hojarasca, diferenciándose de los demás tratamientos (Cuadro 11). Entre las épocas seca y lluviosa se presentaron diferencias significativas ($p<0,05$) para lombrices grandes, total de lombrices, nemátodos saprofitos y bacterias, todos con mayores valores en época lluviosa; el resto de indicadores (que no presentaron interacción sistema*época) fueron iguales estadísticamente en las dos épocas (Cuadro 12).

En cuanto a la respiración microbiana, el cociente metabólico y el índice de mineralización del C, en el PMC se presentaron valores notablemente superiores en la época lluviosa, mientras que en los demás sistemas no se apreciaron diferencias importantes entre las dos épocas (Figuras 5A, 5B y 5C). En la actividad catalasa el CL hizo la diferencia al presentar mayores valores en época lluviosa, mientras que en los demás sistemas ocurrió lo contrario, las mayores diferencias entre sistemas ocurrieron en época seca (Figura 5D). Con respecto a las poblaciones de hongos, el BL y CM presentaron mayores cantidades en época lluviosa, en el BARB y PMC fue lo contrario, y en el CL no hubo diferencias observables entre épocas (Figura 5E). En cuanto a los actinomicetes, el CL y BL presentaron mayores poblaciones en época lluviosa, el BARB presentó mayores poblaciones en época seca y para el CM y PMC no hubo diferencia entre épocas (Figura 5F). La población de nemátodos fitopatógenos fue similar entre sistemas en época lluviosa, pero en la época seca el BL (con el mayor valor) fue diferente al BARB, PMC y CM; en el BL se registraron más nemátodos fitopatógenos en época seca que en la lluviosa, y en el BARB y PMC fue lo contrario (Figura 5G).

Cuadro 11. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores biológicos de suelos de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

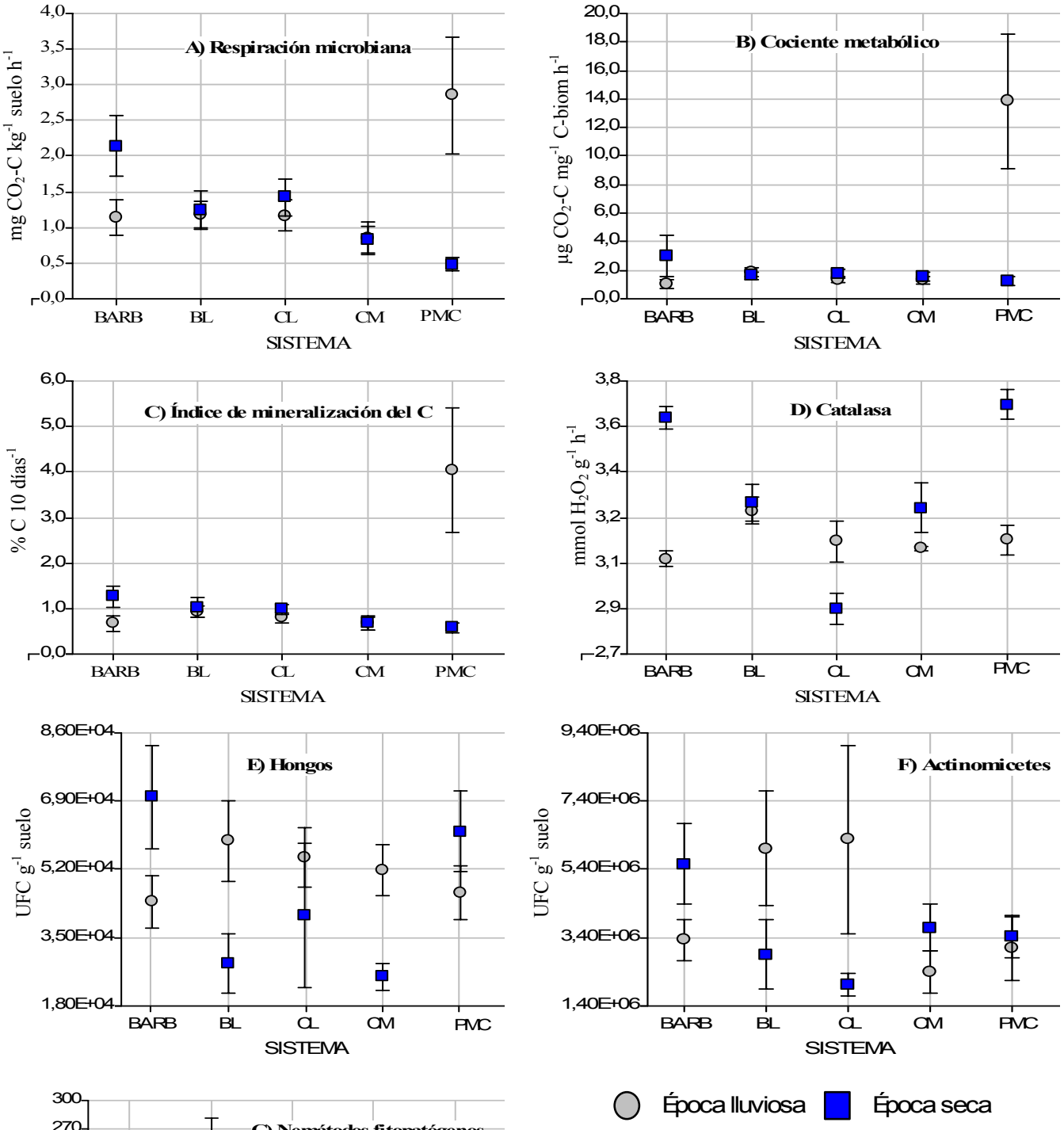
INDICADORES	---------- SISTEMAS ----------					Valor p
	PMC	CM	BL	CL	BARB	ANOVA
Lombrices pequeñas m^{-2}	14,86±9,1	11,33±8,7	16,48±9,4	13,71±9,7	19,33±5,1	0,3099
Lombrices medianas m^{-2}	11,05±8,8 a	11,33±7,1 a	13,33±8,2 a	12,76±8,3 a	20,76±5,4 b	0,0073*
Lombrices grandes m^{-2}	4,76±4,9 a	6,13±4,6 a	7,62±7,6 ab	8,95±7,6 ab	11,43±6,4 b	0,0351*
Total lombrices m^{-2}	30,67±15,2 a	28,80±13,7 a	37,43±16,2 a	35,43±17,9 a	51,52±11,6 b	0,0186*
Nemátodos saprofitos 100 cc^{-1} suelo	87,50±66,26	98,90 ±205,12	70,21 ±74,14	51,43 ±29,23	117,50 ±177,13	0,2052
H Nemátodos fitopatógenos	1,51±0,41	1,40 ±0,27	1,20±0,17	1,33±0,32	1,39±0,19	0,1777
Bacterias (UFC g^{-1} suelo)	7,6E+5 ab ±9,7E+5	1,5E+5 a ±1,6E+5	2,9E+5 ab ±3,2E+5	2,1E+6 b ±4,9E+6	1,7E+7 b ±4,6E+7	0,0442*
Trichoderma (%)	1,79±4,8 a	14,17±9,6 bc	16,67±13,5 c	10,71±18,6 bc	10,12±8,1 b	0,0011*
Clonostachys (%)	6,55±9,9	6,67±8,6	7,14±10,3	6,55±8,1	5,36±9,0	0,9724
Total micoparásitos (%)	8,33±12,6 a	21,67±15,3 b	25,00±21,2 b	19,05±23,7 b	19,05±11,1 b	0,0278*
Biomasa microbiana (mg C-biom kg^{-1} suelo)	392,64 a ±337,31	595,60 ab ±167,03	683,29 bc ±157,00	852,79 cd ±320,51	1080,14 d ±287,06	<0,0001*
Hojarasca (seca) (Kg ha^{-1})	1843,24 a ±709,84	2483,73 a ±753,03	2071,71 a ±844,1	3972,57 b ±965,34	4046,19 b ±7,48,43	<0,0001*

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.
H: índice de Shannon. UFC: unidades formadoras de colonias. *Indica diferencias significativas detectadas con el ANOVA (p<0,05). Letras diferentes en filas indican diferencias significativas entre sistemas (Prueba LSD Fisher, p<0,05).
±: desviación estándar.

Cuadro 12. Medias (± desvío estándar) y análisis de varianza de los indicadores biológicos de suelos de las dos épocas evaluadas en el valle de Talamanca, Costa Rica

INDICADORES	--------- ÉPOCA ---------		Valor p
	Seca	Lluviosa	(ANOVA)
Lombrices pequeñas m^{-2}	13,74±8,14	17,01±9,00	0,0832
Lombrices medianas m^{-2}	13,21±8,32	14,79±8,28	0,4214
Lombrices grandes m^{-2}	5,25±5,51 a	10,50±6,81 b	0,0034*
Total lombrices m^{-2}	32,20±13,61 a	42,30±18,27 b	0,0016*
Nemátodos saprofitos 100 cc^{-1} suelo	35,58±21,19 a	132,97±157,21 b	<0,0001*
H Nemátodos fitopatógenos	1,35±0,33	1,38±0,25	0,6817
Bacterias (UFC g^{-1} suelo)	4,3E+6 ± 1,4E+7 a	5,0E+6 ± 2,8E+7 b	0,0007*
Trichoderma (%)	12,63±15,88	8,33±8,33	0,4096
Clonostachys (%)	8,84±10,61	4,04±6,29	0,1212
Total micoparásitos (%)	22,47±22,39	14,39±11,08	0,1697
Biomasa microbiana (mg C-biom kg^{-1} suelo)	737,85±350,39	719,12±364,63	0,748
Hojarasca (Kg ha^{-1})	2901,86±1238,28	2913,58±1283,43	0,9415

*Indica diferencias significativas detectadas con el ANOVA (p<0,05). Letras diferentes en filas indican diferencias significativas entre sistemas (Prueba LSD Fisher, p<0,05).
±: desviación estándar.



BARB: barbecho; BL: banano-laurel; CL: cacao-laurel; CM: cacao monocultivo PMC: plátano monocultivo convencional. UFC: unidades formadoras de colonias.

Figura 5. Medias para la interacción sistema y época en el valle de Talamanca: A) Respiración microbiana; B) Cociente metabólico; C) Índice de mineralización del C; D) Catalasa; E) Hongos; F) Actinomicetes; y, G) Nemátodos fitopatógenos.

Para los contrastes ortogonales y pruebas "t" (independientemente de la época), se puede destacar que las comparaciones que presentaron la mayor cantidad de indicadores biológicos con diferencias significativas ($p<0,05$) fueron PMC vs. CL BL CM y CL BL vs. PMC; especialmente en lo que respecta a nemátodos, micoparásitos, actividad microbiana (cociente metabólico, índice de mineralización y catalasa), biomasa microbiana y hojarasca; la comparación CL BL vs. BARB también presentó varios indicadores biológicos con diferencias ($p<0,05$) pero más en lo referente a poblaciones de organismos y no tanto así en actividad microbiana (Cuadro 13). En la comparación entre CL y BL solo el % de *Trichoderma*, catalasa y hojarasca fueron diferentes ($p<0,05$); y en la comparación CL BL vs. CM ningún indicador biológico fue diferente (Cuadro 13).

Cuadro 13. Valores de p de los indicadores biológicos para los contrastes ortogonales y otras comparaciones entre los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

	---------- Contrastes ortogonales ----------				---- Prueba "t" ----	
INDICADORES	**BARB vs. el resto**	**PMC vs. CL BL CM**	**CL BL vs. CM**	**CL vs. BL**	**CL BL vs. BARB**	**CL BL vs. PMC**
Lombrices pequeñas m^{-2}	0,0747	0,7325	0,2852	0,4422	0,0661	0,9381
Lombrices medianas m^{-2}	0,0003*	0,5223	0,5133	0,8310	0,0026*	0,4674
Lombrices grandes m^{-2}	0,0101*	0,1133	0,2950	0,5245	0,1885	0,1194
Total lombrices m^{-2}	0,0014*	0,5574	0,2407	0,7617	0,0057*	0,3352
Nemátodos fitopatógenos 100 cc^{-1}	0,0630	0,0088*	0,4882	0,4332	0,0014*	0,0004*
Nemátodos saprofitos 100 cc^{-1}	0,3168	0,0429*	0,2797	0,6976	0,4818	0,2638
H Nemátodos fitopatógenos	0,7348	0,0596	0,2568	0,3133	0,1117	0,0582
Bacterias (UFC g^{-1} suelo)	0,0107*	0,1655	0,1060	0,9272	0,0350*	0,4714
Hongos (UFC g^{-1} suelo)	0,2130	0,2539	0,4985	0,7125	0,2752	0,4037
Actinomicetes (UFC g^{-1} suelo)	0,1966	0,8814	0,7317	0,8623	0,3225	0,8000
Trichoderma (%)	0,7079	0,0001*	0,5843	0,0432*	0,6926	0,0002*
Clonostachys (%)	0,5524	0,7076	0,9665	0,9554	0,5413	0,7435
Total micoparásitos (%)	0,4417	0,0027*	0,9356	0,2929	0,9623	0,0095*
Respiración microbiana (mg CO_2-C kg^{-1} suelo h^{-1})	0,1894	0,0739	0,2475	0,8220	0,2144	0,4431
Biomasa microbiana (µg C-biom kg^{-1} suelo)	<0,0001*	0,0023*	0,1330	0,1493	0,0011*	0,0003*
Cociente metabólico (qCO_2 – C) (µg CO_2-C mg^{-1} C-biom h^{-1})	0,2581	0,0480*	0,3603	0,4368	0,4226	0,1811
Índice de mineralización del C (% C 10 $días^{-1}$)	0,6245	0,0050*	0,3472	0,8847	0,9106	0,1928
Catalasa (mmol H_2O_2 g^{-1} h^{-1})	0,0132	<0,0001*	0,4062	0,0001*	0,0195*	0,0034*
Hojarasca (kg ha^{-1})	<0,0001*	0,0037*	0,1573	<0,0001*	0,0026*	0,0005*

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.
H: índice de Shannon. UFC: unidades formadoras de colonias. Valores de $p<0,05$ indican diferencias significativas;
*Comparaciones que presentaron diferencias significativas.

Se identificaron un total de 25 géneros de nemátodos fitopatógenos. Los géneros con mayor frecuencia relativa fueron *Helicotylenchus, Criconemella* y *Meloidogine*; *Radopholus, Pratylenchus, Helicotilenchus* y *Meloidogine J2* tuvieron mayor frecuencia relativa en el PMC; y *Criconemella* tuvo mayor frecuencia relativa en el CL, BL y CM; *Radopholus* solo apareció en el PMC; y en general, el BL presentó la mayor cantidad de nemátodos fitopatógenos (Cuadro 14); el índice de Shannon de estos nemátodos no presentó diferencias significativas entre los sistemas (Cuadro 11) ni entre las épocas (Cuadro 12).

De hongos se identificaron 13 géneros pero hubo un alto porcentaje de géneros sin identificar, por eso no se calculó el índice de Shannon para hongos; de los que se identificaron los que tuvieron mayor frecuencia relativa fueron *Penicillium* en el CL y BL, y *Fusarium* en BARB (Cuadro 15).

Cuadro 14. Medias de frecuencia absoluta y relativa (de las dos 2 épocas) de géneros de nemátodos identificados en los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

Géneros de nemátodos fitopatógenos	Frecuencia absoluta (nemátodos 100 cc^{-1} suelo)					Frecuencia relativa (%)				
	BARB	BL	CL	CM	PMC	BARB	BL	CL	CM	PMC
Radopholus	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1
Pratylenchus	0,6	2,1	0,1	0,0	5,5	0,8	1,2	0,1	0,0	8,7
Helicotylenchus	14,4	50,1	35,8	38,0	20,6	21,3	28,2	26,0	33,7	32,4
Hoplolaimus	0,1	0,3	2,5	4,3	0,0	0,2	0,2	1,8	3,8	0,0
Ditylenchus	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2
Discocriconemella	19,9	0,6	5,1	0,0	0,9	29,5	0,4	3,7	0,0	1,5
Criconema	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Tylenchus	7,7	10,6	12,0	5,3	9,7	11,4	6,0	8,7	4,7	15,3
Tylenchorhynchus	5,1	0,1	2,1	0,4	0,0	7,6	0,1	1,6	0,4	0,0
Criconemella	7,4	84,1	66,1	40,0	2,6	11,0	47,3	48,1	35,4	4,0
Xiphinema	1,0	0,3	2,0	1,2	0,1	1,5	0,2	1,5	1,1	0,2
Ecphyadophora	0,0	0,1	1,2	0,0	0,5	0,0	0,0	0,9	0,0	0,8
Lobocriconema	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Hemicriconemoides	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
Hemicycliophora	0,1	0,1	0,3	2,1	0,1	0,2	0,0	0,2	1,9	0,1
Trichodorus	0,1	0,3	0,1	2,2	4,1	0,2	0,2	0,1	1,9	6,4
Scutellonema	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,6
Paratylenchus	1,2	3,1	0,6	0,9	0,9	1,8	1,7	0,5	0,8	1,5
Rotylenchulus	1,6	0,0	0,1	0,0	2,4	2,3	0,0	0,1	0,0	3,8
Meloidogyne J2	4,6	23,6	7,1	15,0	11,5	6,8	13,3	5,2	13,3	18,1
Aphelenchoides	0,3	1,1	0,4	0,5	0,6	0,4	0,6	0,3	0,4	1,0
Aphelenchus	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1
Gracilacus	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Heteroderidae J2	3,0	0,1	0,5	1,0	0,6	4,4	0,1	0,4	0,9	1,0
Boleodorus	0,0	1,1	0,7	1,7	0,1	0,0	0,6	0,5	1,5	0,2
Total	67,5	177,9	137,4	112,9	63,6	100	100	100	100	100

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.

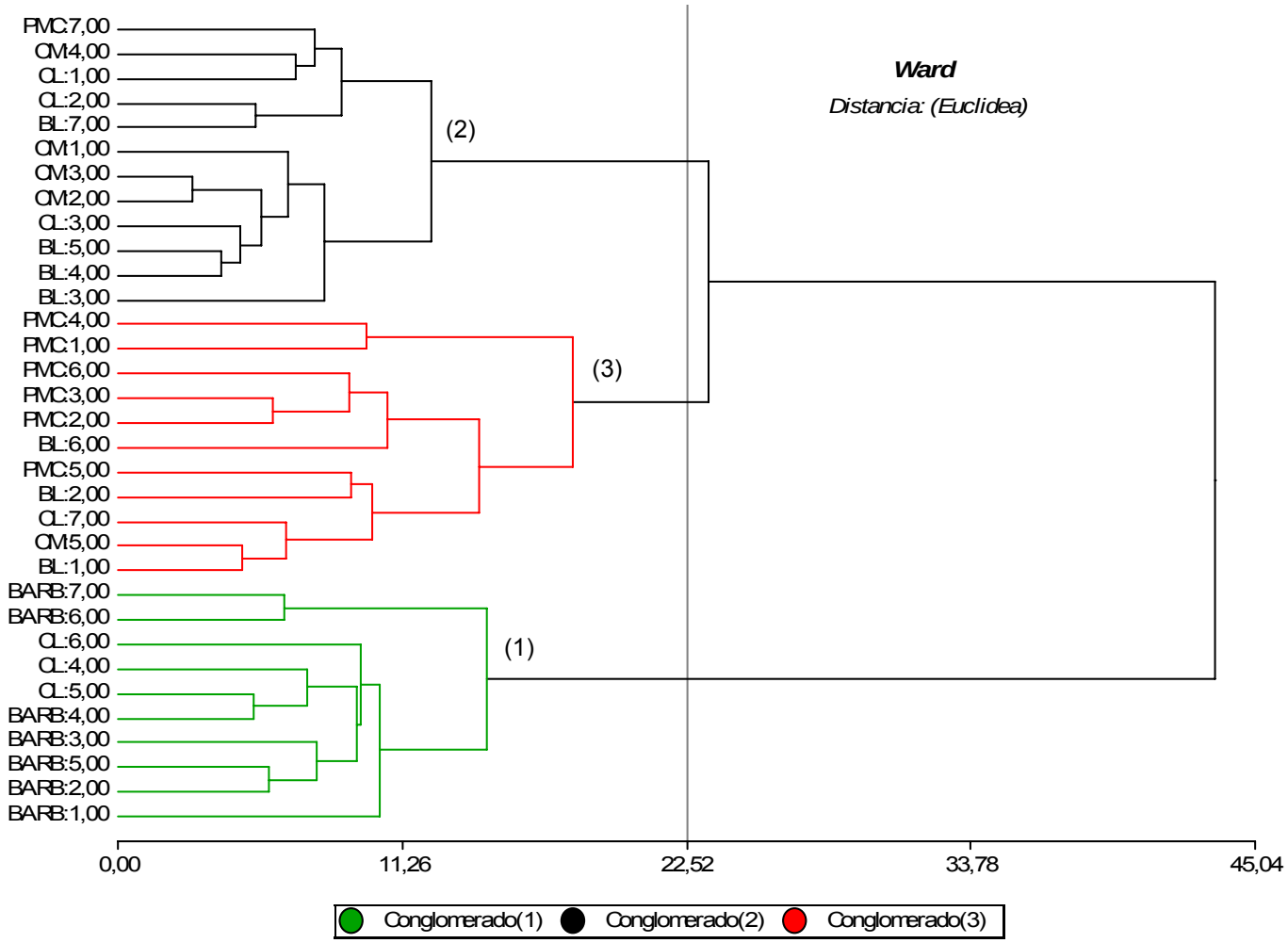
Cuadro 15. Frecuencia relativa de géneros de hongos identificados en los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

Géneros de hongos	Frecuencia absoluta					Frecuencia relativa (%)				
	BARB	BL	CL	CM	PMC	BARB	BL	CL	CM	PMC
Penicillium	13,6	12,8	14,4	6,6	11,8	23,8	30,9	30,2	21,0	24,2
Mucor	1,1	0,9	1,0	1,4	2,4	1,9	2,2	2,1	4,6	4,8
Fusarium	9,1	1,9	2,8	1,2	4,3	16,0	4,7	5,8	3,9	8,8
Aspergillus	0,7	1,4	0,3	0,0	0,4	1,3	3,5	0,6	0,0	0,9
Humicola	3,1	0,2	0,0	0,0	0,0	5,5	0,5	0,0	0,0	0,0
Morti	0,4	0,2	0,0	0,0	0,1	0,8	0,5	0,0	0,0	0,3
Trichoderma	2,8	2,0	3,7	1,9	4,5	4,9	4,8	7,8	6,0	9,2
Phoma	0,2	1,0	0,6	1,3	1,2	0,4	2,4	1,3	4,3	2,5
Verticillium	1,7	0,7	0,1	0,2	1,1	3,0	1,7	0,3	0,7	2,3
Poae	1,2	1,1	2,2	2,1	1,1	2,1	2,6	4,6	6,8	2,3
Pythium	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,9
Acremonium	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Sin identificar	22,8	18,9	22,5	16,4	21,4	40,0	45,8	47,2	52,7	43,8
Total	57,0	41,4	47,7	31,2	48,8	100	100	100	100	100

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.

3.6 Análisis de conglomerados

Este análisis se hizo con todos los indicadores (físicos, químicos y biológicos) y se formaron tres conglomerados: el conglomerado (1) compuesto por todos los BARB y por tres CL, el conglomerado (2) compuesto en por la mayoría de sistemas de CM, CL y BL y un PMC, y el conglomerado (3) compuesto por casi todos los PMC y la minoría de CM, CL y BL; en ningún conglomerado estuvieron juntos BARB, BL, CM y PMC (Figura 6).



BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.

Figura 6. Dendrograma de los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

3.7 Indicadores de mayor peso seleccionados con análisis discriminante y ANOVA

Se seleccionaron los indicadores de mayor peso identificando los que diferenciaron más a los sistemas mediante el ANOVA y prueba LSD Fisher ($p<0,05$) (Cuadros 7, 9 y 11, y Figura 5), e identificando los indicadores que más discriminan los grupos conformados por conglomerados mediante el análisis discriminante (valores absolutos de los datos estandarizadas con la varianzas comunes en ANEXO 13). Bajo ese criterio, se seleccionaron 32 indicadores de mayor peso, con los que fue posible hacer el análisis multivariado de la varianza para los sistemas y conglomerados:

- **Biológicos:** nemátodos fitopatógenos, nemátodos saprofitos, hongos, bacterias, actinomicetes, respiración microbiana, biomasa microbiana, cociente metabólico, índice de mineralización, catalasa, lombrices grandes, total lombrices, *Trichoderma*, total micoparásitos y hojarasca.
- **Químicos:** N total, C total (materia orgánica), pH, Ca, K, P, Mg, Mn, Fe, Zn, C en FG, C en agregados de 8-2mm y C en agregados de 250-53 µm.
- **Físicos:** DA, % de agregados 8-2 mm, % de agregados 250-53 µm, % suelo <53 µm.

3.8 Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) para sistemas y conglomerados

El MANOVA se hizo con los 32 indicadores de mayor peso seleccionados, se presentaron diferencias significativas (prueba Hotelling, $p<0,0001$) entre los 5 sistemas evaluados (Cuadro 16) y entre los 3 conglomerados formados (Cuadro 17).

Cuadro 16. Análisis multivariado de la varianza con los 32 indicadores de mayor peso para los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca

SISTEMAS	Hotelling
Plátano monocultivo convencional	A
Cacao monocultivo	B
Banano-laurel	C
Cacao-laurel	D
Barbecho	E

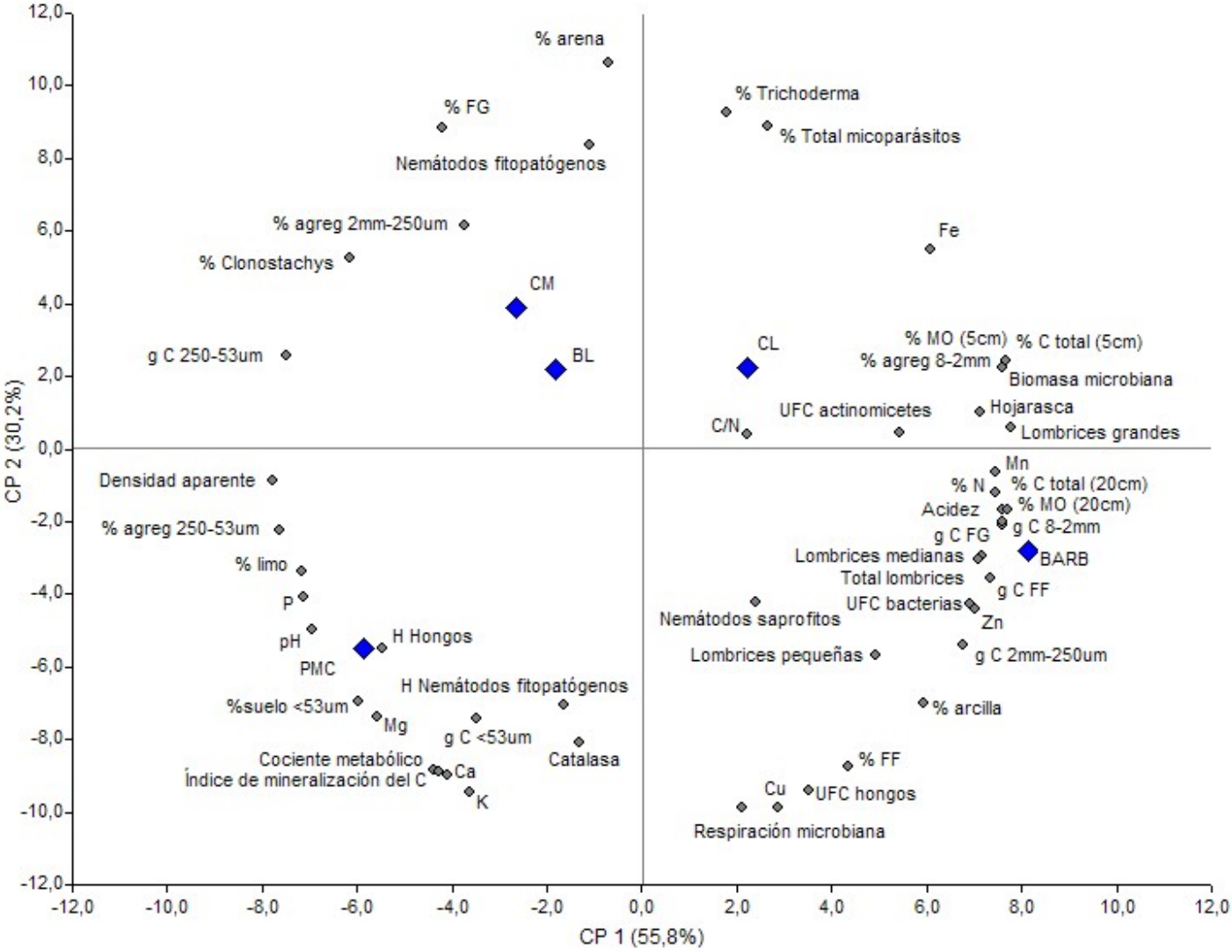
Cuadro 17. Análisis multivariado de la varianza con los 32 indicadores de mayor peso para los 3 conglomerados formados

Conglomerados formados	Hotelling
Conglomerado 1	A
Conglomerado 2	B
Conglomerado 3	C

3.9 Análisis de componentes principales

Los dos primeros ejes explicaron el 86% de la varianza de los indicadores. El BARB fue el que se separó más del PMC; el CL estuvo más próximo al BARB; y el BL y CM estuvieron más cercanos al PMC. El BARB especialmente, y el CL, fueron los que presentaron mayor correlación positiva

con el % N, % materia orgánica, C en agregados y fracciones, lombrices y microorganismos, biomasa microbiana y hojarasca; mientras que el PMC tuvo más correlación positiva con el pH, P, K, Ca, Mg y % de limo, y con indicadores de actividad microbiana; el CM, BL y CL presentaron mayor correlación positiva con micoparásitos y nemátodos fitopatógenos (Figura 7). El % N y varios indicadores que involucran al C tuvieron poca correlación con los demás nutrientes y correlación negativa con DA y % limo; los indicadores de actividad microbiana mostraron correlación negativa con la biomasa microbiana y % materia orgánica y poca correlación con las poblaciones de microorganismos; la biomasa microbiana, UFC de actinomicetes y poblaciones de lombrices mostraron correlación positiva con el % materia orgánica y hojarasca (Figura 7).



BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.
FG: fracción gruesa; FF: fracción fina; MO: materia orgánica; UFC: unidades formadoras de colonias

Figura 7. Biplot de análisis de componentes principales de todos los indicadores y los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica.

3.10 Selección de 12 indicadores de mayor peso para determinar calidad de suelos

Si hubiera que recomendar solo 12 indicadores (los de mayor peso) para determinar calidad de suelos y compararla entres sistemas, con base en el análisis discriminante y en el ANOVA como se mencionó anteriormente, se propondrían los siguientes:

Biológicos: respiración microbiana, biomasa microbiana, número total de lombrices, total de micoparásitos, actinomicetes, nemátodos fitopatógenos.
Químicos: pH, C total (materia orgánica), N total y K.
Físicos: DA y % de agregación.

3.11 Índice de calidad de suelos aditivo (ICSA)

Se calculó el ICSA de cuatro formas: con todos los indicadores (ICSA TOTAL), con los 32 indicadores de mayor peso (ICSA 32 IMP), con los 12 indicadores de mayor peso (ICSA 12 IMP) y sin incluir a los indicadores químicos (ICSA SINQMC); este último se calculó así porque el PMC es el único sistema que se fertiliza, y se deseaba saber qué pasaría sí se considerara que todos los sistemas tuvieran iguales propiedades químicas. En los cuatro casos el BARB tuvo mayor ICSA que los demás sistemas ($p<0,05$); con el ICSA TOTAL los demás sistemas (PMC, CM, CL y BL) fueron estadísticamente iguales; con el ICSA 32 IMP el CM se diferenció de todos ya que presentó el menor valor ($p<0,05$), los sistemas BL, CL y PMC fueron iguales; con el ICSA 12 IMP pasó lo mismo que con el ICSA TOTAL; y, con el ICSA SINQMC ocurrió algo diferente, pues el PMC registró el menor valor ($p<0,05$), diferenciándose del CL y BARB (Cuadro 18).

Cuadro 18. Índice de calidad de suelos aditivo (ICSA) para los 5 sistemas evaluados en el valle de Talamanca, Costa Rica

ÍNDICES	SISTEMAS					Valor p
	PMC	CM	BL	CL	BARB	(ANOVA)
ICSA TOTAL	19,3 a	18,8 a	20,5 a	19,5 a	24,4 b	<0,0001
ICSA 32 IMP	12,3 ab	11,7 a	12,4 ab	13,4 b	16,8 c	<0,0001
ICSA 12 IMP	6,3 a	6,2 a	6,4 a	7,1 a	8,9 b	<0,0001
ICSA SINQMC	13,7 a	14,6 ab	15,1 ab	15,8 b	19,3 c	<0,0001

BARB: barbecho; PMC: plátano monocultivo convencional; CL: cacao-laurel; BL: banano-laurel; CM: cacao monocultivo.
ICSA TOTAL: con todos los indicadores; ICSA 32 IMP: con los 32 indicadores de mayor peso; ICSA 12 IMP: con los 12 indicadores de mayor peso; ICSA SINQMC: sin indicadores químicos.
Letras diferentes en filas indican diferencias significativas entre sistemas (Prueba LSD Fisher, $p<0,05$).

4. DISCUSIÓN

Se analiza el ICSA como indicador general de calidad de suelo y posteriormente se discuten los indicadores evaluados (materia orgánica, fertilidad (nutrientes), poblaciones de organismos y actividad microbiana) que condujeron a que el PMC, CL, CM y BL tuvieran igual calidad de suelos; y, se destacan diferentes aspectos para mantener y corregir, según el caso, la calidad de suelos en el valle de Talamanca.

4.1 Índice de calidad de suelos aditivo (ICSA)

En las cuatro formas que se calculó el ICSA, el BARB fue el mejor, lo que indica que un sistema natural en recuperación después de la intervención del hombre, tiene mejor calidad de suelos y por tanto, es útil para usarlo como control. De acuerdo con el ICSA TOTAL como en el ICSA 32 IMP y el ICSA 12 IMP, el PMC tuvo igual calidad de suelos que los sistemas agroforestales (BL y CL) y CM, esto se debió a que, a pesar de sus indicadores biológicos y físicos son menores que el resto de los sistemas, es el único sistema con entradas a través de la aplicación de fertilizantes sintéticos y esto le ha dado ventajas principalmente en cuanto al contenido de nutrientes (fertilidad). Esto se confirma con el ICSA calculado sin indicadores químicos (ICSA SINQMC), donde el BARB y CL serían los mejores y el PMC presentó los valores más bajos, lo que muestra claramente el impacto de la fertilización sobre las características químicas del suelo. Quizá se hubiesen encontrado más diferencias significativas en el ICSA TOTAL, ICSA 32 IMP e ICSA 12 IMP si los manejos fueran más contrastantes, como fue en el caso de otros estudios en que la calidad de suelos fue mejor en sistemas agroforestales con café orgánicos que en cafetales convencionales, donde en los sistemas orgánicos, además del impacto de una sombra más diversa, se cuenta con la aplicación de abonos orgánicos (George 2006, Porras 2006), algo que en Talamanca no se hace en el CL, BL ni CM.

Más bien se debe destacar que los sistemas agroforestales (CL y BL), a pesar de no ser fertilizados con insumos externos y tener poco manejo, tuvieron igual calidad de suelos que un sistema con prácticas frecuentes y aplicación de fertilizantes como el PMC, principalmente por mantener mejor las propiedades físicas y biológicas del suelo.

4.2 Materia orgánica

De todos los sistemas solo el CL y BARB superaron el 3,4 % de materia orgánica, localizándose por encima del 2 % de C orgánico, considerado por Maldonado *et al.* (2006), como el mínimo necesario

para estabilizar el suelo y lograr una producción sostenible. El buen porcentaje de materia orgánica en CL (4,2 %) que lo asemejan al BARB (5 %), se explica por el importante aporte de hojarasca de los árboles de cacao, laurel y otros, además de los residuos de poda de árboles de cacao; con esto se confirma que los sistemas agroforestales protegen y promueven un mayor contenido de materia orgánica en el suelo. El CM igualó estadísticamente al CL en % de materia orgánica, pero no al BARB. El BL presentó porcentajes menores (2,7 %), porque aunque también presenta laureles y otros árboles de sombra, no se produce la cantidad ni el tipo de biomasa que aportan los árboles de cacao. Se podría decir, de acuerdo con Maldonado *et al.* (2006), que en plantaciones de banano y plátano, los residuos vegetales después de una cosecha, ayudan a mantener la materia orgánica y protegen al suelo de la erosión, pero según los datos de este estudio, no igualan al CL y BARB.

4.3 Porcentaje y contenido de C en agregados y fraccionamiento de materia orgánica

Los datos obtenidos en fraccionamiento de materia orgánica son comparables con los resultados de Meléndez (1997), donde se observa que los sistemas agroforestales mantienen más C y N en las fracciones más grandes del suelo (llamadas macro materia orgánica), que otros sistemas anuales convencionales. Esto es importante porque se mantiene C y N en agregados grandes que son menos susceptibles a pérdidas por erosión o lixiviación. Las dos metodologías utilizadas en este estudio (fraccionamiento de materia orgánica y C en agregados) lo evidencian, ya que el CL y BL tuvieron mayor contenido de C en los agregados de 8 – 2 mm y en la FG que el PMC; en este caso se diría que los sistemas agroforestales mantienen más C en la macro materia orgánica del suelo que platanales convencionales.

Con el fraccionamiento de materia orgánica, el CL, BL y CM tuvieron más % de FG (también llamada Fracción Gruesa o macro materia orgánica de lenta descomposición) que % de FF (también llamada fracción mineral), en BARB y PMC fue lo contrario. De acuerdo con Karlen *et al.* (1992) esto podría explicarse por el tipo de vegetación, ya que proveen diferentes fuentes de C para los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, y fijación e inmovilización del N. En CL, BL y CM hay mayor acumulación de hojarasca de cacao y de laurel, cuya descomposición se considera muy lenta (Vilas 1991), bajo estas condiciones, el procesamiento de la FG y transferencia de este material a la FF también es más lento (Meléndez 1997). En el PMC la materia orgánica proviene de los residuos vegetales de los plátanos, que son más fáciles y rápidos de descomponer y mineralizar, y por eso se explica que hayan tenido mayor % de FF.

En el % de agregación, el % y contenido de C de agregados de 8 – 2 mm fueron útiles e importantes para diferenciar sistemas cultivados, porque fueron mayores en los sistemas agroforestales (CL y BL) ($p<0,05$) que en el PMC, además que sirvió para explicar otros indicadores y fue uno de los componentes principales de BARB y CL. Resultados similares fueron observados por Soto *et al.* (2007) done los sistemas agroforestales de café tuvieron mayor % y contenido de C en agregados de 8 – 2 mm que cafetales convencionales. Las mismas diferencias no se evidenciaron ni con la FF ni con la FG con la metodología de fraccionamiento de materia orgánica; por lo que se podría decir que el % de agregación y C en los agregados son más sensibles para diferenciar sistemas agroforestales de sistemas convencionales de producción.

4.4 Fertilidad (Nutrientes)

Uno de los componentes de la calidad de suelos es la productividad, que se logra en gran parte gracias a una buena fertilidad del suelo, por eso se debe dar igual importancia y atención al contenido de nutrientes y al pH, al igual que se hace con otros indicadores físicos y biológicos. La mayor ventaja que tiene el PMC es el mayor contenido de P, K, Ca y Mg, y menor pH que en los suelos de los otros sistemas; esto le permite al PMC tener mayores valores en el ICSA y por tanto, tener igual calidad de suelos que el CL y BL.

Los mayores contenidos de dichos nutrientes y menor pH en suelos de PMC se explican por la aplicación de fertilizantes sintéticos como la fórmula completa y urea azufrada. Además, la aplicación de insecticidas (clorados fosforados y piretroides), como los que se aplican en el PMC, también incrementan la disponibilidad de P en el suelo, esto sugiere que se incrementan las actividades de microorganismos que intervienen en la mineralización y solubilización del P, y que se libera P de la fauna animal muerta por efecto de los insecticidas (Das y Mukherjee 2000).

Un aspecto importante a considerar en el PMC es el % de N total, pues a pesar de que se aplican fertilizantes sintéticos el contenido de N es menor que en los otros sistemas. Con la aplicación de urea el contenido de N debería ser notablemente superior que cuando no se aplica (Stark *et al.* 2007). Esto indica que puede haber una considerable lixiviación y volatilización de N en los suelos de PMC por no tener una cobertura de hojarasca como la tienen los otros sistemas, aparte de las pérdidas de N por extracción en las cosechas.

Por otra parte, en el PMC se registraron valores de Zn y Mn por debajo del nivel crítico. Aunque estos micronutrimentos se requieren en cantidades extremadamente pequeñas, tienen papel vital en el funcionamiento de las plantas (Gliessman 2002). En suelos de plátano de Venezuela, las plantas presentaron deficiencias de Fe y Mn, este desbalance nutricional se debió en gran parte a las altas concentraciones de Ca y Mg, pH elevado y gran contenido de limo (>47%) (Bravo y Echenique 2002); condiciones de suelo muy similares a las observadas en los suelos de PMC.

En el CL, a pesar de que no se aplica ningún tipo de insumos químicos ni orgánicos, el % de N total fue superior al de BL y PMC y similar al registrado en BARB. En los sistemas agroforestales las prácticas de manejo (en este caso las podas) pueden incrementar la cantidad total de nutrientes en el sistema planta-suelo al mejorar el reciclaje de nutrientes y reducir pérdidas de los mismos (Schroth *et al.* 2003, Isaac *et al.* 2007); esto indica que en este tipo de sistemas las pérdidas de N por lixiviación y erosión son mucho menores que en monocultivos (Hartemink 2005). Por otra parte, las pérdidas de N por volatilización también serían menores al tener una cobertura importante de hojarasca como la tiene el CL. Además, la hojarasca en sistemas agroforestales es la mayor proveedora de N (Chander *et al.* 1998). Aunado a esto, en CL se encontraron árboles de guaba y madero negro que son capaces de fijar N atmosférico y así contribuyen a las reservas de N en el sistema.

Los principales problemas de fertilidad en el BARB, BL, CL y CM son el P, K y pH; ya que en la mayoría de los casos sus valores están por debajo del nivel crítico ó apenas lo sobrepasan. Si estos sistemas tuvieran similar o mayores contenidos de esos nutrientes y pH que el PMC, tendrían notoriamente, un mayor valor total en el ICSA. Por tanto, la fertilidad de suelos se debe corregir y mejorar para mejorar los rendimientos de los cultivos.

La disponibilidad de P puede ser menor en sistemas agroforestales que en monocultivos, pero esta es una limitante general en los suelos de agroecosistemas tropicales, debido a la alta fijación de este nutriente en suelos ácidos (Isaac *et al.* 2007); en otros suelos de sistemas agroforestales con cacao en Costa Rica también se reportaron bajos contenidos de P (Fassbender *et al.* 1991). La absorción de K por el cacao es fácilmente promovida bajo sistemas agroforestales (Isaac *et al.* 2007); sin embargo, cuando los árboles de sombra no son podados (laurel y otros; y árboles de cacao que son pobremente podados en este caso), una cantidad considerable de nutrientes son almacenados en los tallos de los árboles y no se devuelven al suelo, en especial K, y por tanto se convierte en un factor potencialmente limitante para la productividad del cultivo (Beer 1988). Los pH de CL y BARB

fueron los menores, aunque están apenas por debajo del ámbito óptimo esto podría tener efectos negativos en la absorción de algunos nutrientes como K y P (Bertsch 1995) y en los indicadores biológicos (Gliessman 2002). Los mismos problemas pueden presentarse con la acidez, pues los valores fueron elevados, excepto en el PMC.

En cuanto al ciclaje de nutrientes, por una parte se podría suponer que en BL, CL y CM los balances de nutrientes sean negativos, pues no se aplican ningún tipo de insumos para fertilizar y la única entrada de nutrientes al sistema sería a través de las lluvias. Éstas proveen principalmente N, P, K, Ca y Mg pero en bajas cantidades (de Oliveira y Valle 1990). Pero por otra parte, se podría decir que en los sistemas agroforestales (CL y BL) las cantidades de nutrientes en el suelo se mantienen. Se considera que en cacaotales las pérdidas por erosión y lixiviación son mucho menores que en monocultivos, y de las reservas de nutrientes de estos sistemas, una fracción no muy grande es removida con la cosecha del grano de cacao; por tanto, más nutrientes son reciclados que perdidos anualmente, esto es importante para la sostenibilidad, ya que se considera que mientras mayor sea el reciclaje de nutrientes mayor es la autosuficiencia del sistema (Hartemink 2005). En estudios hechos en Brasil se observó que los sistemas agroforestales de cacao son autosuficientes en términos de requerimiento de nutrientes (de Oliveira y Valle 1990). En el caso del PMC, hay entradas de nutrientes al sistema, pero es posible que el balance de varios nutrientes (especialmente N) sea negativo debido a pérdidas por lixiviación y volatilización, y mayor extracción de nutrientes en las cosechas de plátano; esto no sería sostenible, porque aparte de depender de una fertilización inorgánica, no se estaría manteniendo adecuadamente la reserva de nutrientes en el suelo.

4.5 Textura y humedad

La textura, a diferencia de los demás indicadores, no está influenciada por el manejo, ya que es una propiedad inherente del suelo y por tanto, puede ser considerada como una ventaja natural que afecta la calidad de un suelo (Gliessman 2002). Sin embargo, la textura es muy importante porque afecta las variables físicas (porosidad, agregación, retención de agua), químicas (intercambio catiónico) y biológicas consecuentemente (Henríquez y Cabalceta 1999). En general, una textura franco arcillosa puede ser buena para cultivos en ambientes secos, y una franco arenosa es mejor en ambientes húmedos (como en Talamanca) (Gliessman 2002). En este estudio la mayoría de los suelos de CL, CM y BL tuvieron textura franco o franco arcillosa, aunque presentaron más de 40 % de arena, y en PMC la mayoría fueron franco limosos. Esto explica, al menos parcialmente, los altos contenidos de humedad observados en los sistemas PMC durante todo el ciclo de estudio. La

humedad de los suelos, en este estudio, no se considera un indicador *per se*, pero sirve para explicar indicadores biológicos como se verá más adelante.

4.6 Densidad aparente (DA), % de agregación y materia orgánica

La DA aparente es uno de los indicadores más importantes, útiles y utilizados en estudios de calidad de suelos. En este estudio el CL y BARB registraron los mayores % de materia orgánica y % de agregados de 8 – 2 mm, y consecuentemente registraron las menores DA; estos tres indicadores están estrechamente correlacionados, lo que se muestra en el biplot de componentes principales (Figura 7). La DA puede ser afectada por la textura, porosidad, agregación y materia orgánica (Arshad y Coen 1992); la materia orgánica es uno de los factores fundamentales porque influye en la estructura del suelo al mejorar la estabilidad de agregados (Stenberg *et al.* 2000), favorece a una mejor distribución de poros de diferentes tamaños (Kirkby y Powlson 2004) y disminuye la densidad aparente porque sus componentes son menos densos que los componentes minerales (Henríquez y Cabalceta 1999). En el PMC, aparte de los menores % de materia orgánica y de agregados de 8 – 2 mm, se registraron mayores % porcentajes de suelo en la fracción menor a 53 µm y de limo, por lo que se puede explicar la mayor DA observada en este sistema.

4.7 Lombrices

El BARB tuvo mayor cantidad de lombrices y con diferencias significativas en la mayoría de los casos; esto indica que las lombrices son especies clave para diferencias sistemas naturales de los intervenidos por el hombre. Entre los sistemas manejados (CL, CM, BL y PMC) no se presentaron diferencias significativas para ninguno de los tamaños y número total de lombrices. No obstante, sí se obsevó que la población de lombrices grandes de CL y BL fue igual a la de BARB, con lo que se podría parcialmente explicar las semejazas de estos sistemas en % de materia orgánica, % N total, DA y % de agregación. Las lombrices a través de los túneles que hacen favorecen a la formación de macroporos y a través de los exudados que liberan favorecen a la agregación del suelo; así, mejoran las condiciones de aireación, movimiento de gases y agua, y reducen la DA (Francis y Fraser 1998, Buck *et al.* 2000). Al ser más grandes las lombrices se supone que dichos efectos serían más marcados y por eso el CL, BL y BARB serían parecidos y mejores en los indicadores mencionados en comparación con el PMC.

Por la aplicación de fertilizantes y plaguicidas sintéticos en el PMC, se hubiese esperado que este sistema tenga menor población total de lombrices que los otros sistemas, pero fue estadísticamente igual. Se podría explicar esto porque los platanales tuvieron mayor humedad que los demás sistemas en la época seca, y las lombrices dependen en gran medida de este parámetro (Coyne 2000). Por otra parte, en el CL, BL y CM, aunque no tuvieron las condiciones de humedad del PMC en la época seca, presentaron similar población de lombrices, lo que indica que la menor humedad en esa época puede ser compensada con el mayor contenido de materia orgánica y otras condiciones que favorecen a las lombrices. En otros estudios, donde las condiciones de humedad de suelo eran similares, sí se encontró que los sistemas agroforestales presentaron mayor población de lombrices que sistemas convencionales, con diferencias significativas (George 2006 y Porras 2006).

4.8 Nemátodos

Para nemátodos saprofitos no hubo diferencia significativa entre los sistemas evaluados. Se hubiese esperado mayores poblaciones de nemátodos saprofitos en el BARB, CL, BL y CM porque por los altos contenidos de materia orgánica, que es la condición ideal para estos nematodos (Bongers y Bongers 1998); y por las altas poblaciones de microorganismos (de los cuales se alimentan). La explicación para el CL, BL y CM puede ser que estos sistemas tuvieron menor humedad en la época seca, y en esas condiciones disminuye la abundancia de nemátodos, en particular de los que se alimentan de bacterias y hongos (Ferris *et al.* 2004).

La población de total de nemátodos fitopatógenos fue menor en PMC en ambas épocas, lo que se puede explicar por el uso de nematicidas por lo menos una vez al año. Pero, en estos sistemas los géneros *Radopholus, Pratylenchus, Helicotilenchus* y *Meloidogine J2* tuvieron mayor frecuencia relativa que en los otros sistemas; y justamente esos géneros son los más devastadores para la producción de cultivares comerciales de banano y plátano a nivel mundial (Araya 1995). Esto indica que los nematicidas están eliminando a muchos nemátodos fitopatógenos, pero no se está eliminando en la proporción que se desearía a los nemátodos con mayor potencial destructivo para el cultivo de plátano.

El género *Radopholus* fue encontrado solo en PMC, quizá esto pueda relacionarse con las poblaciones de *Trichoderma,* ya que se ha demostrado que micoparásitos del género *Trichoderma*, especialmente *T. atroviride*, tienen efectos antagonistas efectivos para reducir o suprimir a *Radopholus similis* (Felde *et al.* 2005). El PMC tuvo el menor % de colonización de *Trichoderma* y

del total de micoparásitos; mientras que en los otros sistemas esos porcentajes fueron superiores significativamente.

4.9 Biomasa microbiana

La biomasa microbiana es otro indicador clave en calidad de suelos que es frecuentemente utilizado en este tipo de estudios, además, que se utiliza en el cálculo del cociente metabólico que sirve para explicar la actividad microbiana en el suelo como se verá posteriormente. La biomasa microbiana es mayor en sistemas agroforestales y está influida por la cantidad de materia orgánica del suelo (Chander *et al.* 1998). Esto se confirma en este estudio porque el BARB y CL fueron los que presentaron mayores valores de biomasa microbiana (853 mg C-biom kg^{-1}), % de materia orgánica y cantidad de hojarasca; y en el PMC fue todo lo contrario. El biplot de componentes principales (Figura 7) confirma que esos tres indicadores mencionados se correlacionan positivamente entre sí. Los resultados en CM y BL se consideran adecuados por estar alrededor de los 600 mg C-biom kg^{-1}. La baja cantidad de biomasa microbiana registrada en el PMC (393 mg C-biom kg^{-1}) es uno de los principales problemas de este sistema y es un reflejo de que las condiciones para la actividad microbiana no son buenas en estos suelos.

Con esos resultados en el PMC y los de otros estudios se puede respaldar que la aplicación de insumos sintéticos como fertilizantes son perjudiciales para la biomasa microbiana. En este estudio el CL tuvo 853 mg C-biom kg^{-1} suelo, y en otro sistema agroforestal cacao-laurel, pero con fertilización de N y P, fue mucho menor con 366 mg C-biom kg^{-1} (Meléndez 1997). Cafetales agroforestales orgánicos tuvieron entre 800 y 1000 mg C-biom kg^{-1}, y cafetales convencionales tuvieron valores menores (Porras 2006). Con altos contenidos de materia orgánica la biomasa microbiana (>600 mg C-biom kg^{-1}) es mayor que con aplicaciones de urea (<400 mg C-biom kg^{-1}) (Stark *et al.* 2007). Las aplicaciones de N inorgánico (como la urea) a largo plazo reducen la biomasa, población y actividad microbiana (Fauci y Dick 1994b, Stark *et al.* 2007).

4.10 Poblaciones de microorganismos

Las poblaciones de microorganismos, en general, fueron mayores en los sistemas agroforestales (CL y BL) y BARB que en PMC, especialmente en cuanto a bacterias, actinomicetes y micoparásitos que se consideran especies clave en calidad de suelos, en cuanto a hongos no hubo diferencias claras. Los actinomicetes son microorganismos aerobios capaces de sobrevivir con poca humedad y

participan en la descomposición de celulosa y lignina (Benzing 2001); en su mayoría son saprofitos y proliferan más con un mayor contenido de materia orgánica, especialmente cuando está en sus últimas etapas de descomposición (Coyne 2000). Los micoparásitos son importantes para regular poblaciones de hongos y hasta nemátodos fitopatógenos que pueden dañar los cultivos.

En el PMC se aplican insumos sintéticos que afectan a los microorganismos, pero no todos son afectados de igual forma. Se argumenta que existen microorganismos sensitivos y no sensitivos a los plaguicidas, la aplicación de éstos causa la muerte a los sensitivos y también a la macrofauna del suelo, de esta forma se liberan nutrientes (disponibilidad de N y P especialmente) que son aprovechados por los no sensitivos y como resultado se da un incremento de poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetes (Das y Mukherjee 2000); por otra parte, se ha encontrado que el glifosato con dosis recomendadas de aplicación, no afecta a los microorganismos del suelo, y cuando es degradado es fuente de C, N y P (Busse *et al.* 2001). En los suelos del PMC, posiblemente suceda esto con los hongos, pero no en el caso de bacterias, actinomicetes y micoparásitos, pues serían más los individuos muertos por efecto de los plaguicidas que los que sobreviven, ya que sus poblaciones en términos generales, son menores a las de BARB y CL. Aunado a esto, los fungicidas que llegan al suelo, al igual que los fertilizantes sintéticos, pueden ser detrimentales para microorganismos descomponedores (Fauci y Dick 1994b, Vargas y Flores 1996, Stark *et al.* 2007).

En el caso de micoparásitos, en otros estudios se encontró que fumigaciones con nematicidas e insecticidas (como el Telone C-35) promovieron una mayor presencia y colonización de *Trichoderma*, y se explicó esto porque este micoparásito tiene gran resiliencia a biocidas comparado con otros hongos y habilidad para colonizar rápidamente sustratos orgánicos en la ausencia de competencia microbiana, lo mismo puede ocurrir para *Clonostachis* (Papavisas 1985, Leandro *et al.* 2007). Esto se rechazaría con los resultados de este estudio, ya que en el PMC, donde se aplican nematicidas e insecticidas por lo menos una vez al año, se registró un bajo % de colonización de *Trichoderma* (1,8 %) y el menor % de colonización del total de micoparásitos. Esto es preocupante porque se estaría reduciendo la población de especies de *Trichoderma*, que son beneficiosas y aportan a la calidad de suelos por ser micoparásitos y antagonistas de amplio espectro, además de ser promotoras del crecimiento de las plantas (Bailey y Lumsden 1998).

Algunos autores sostienen que si los plaguicidas se usan correctamente no habrán efectos deletéreos sobre el crecimiento y actividades de los principales microorganismos encargados de las transformaciones de C, N y P; sin embargo, hay un efecto letal sobre otros microorganismos y

macrofauna del suelo (Das y Mukherjee 2000). Por esta razón siempre la aplicación de plaguicidas puede ser riesgosa por el impacto sobre la biodiversidad del suelo, que es importante para mantener la sostenibilidad de sistemas de producción agrícola (Nielsen and Winding 2002, Stark *et al.* 2007).

Sin embargo en el presente estudio no se detectó un efecto de los insumos sintéticos sobre la diversidad de nemátodos fitopatógenos, dado que no hubo diferencias entre los sistemas evaluados. No se tienen datos de biodiversidad en las poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetes porque se presentaron dificultades para la identificación de los diferentes géneros. Aparte de la biodiversidad, también son importantes los grupos funcionales y especies clave porque pueden relacionarse con las funciones del ecosistema (Bengtsson 1998). Considerando esto, habría que enfocarse en actinomicetes y micoparásitos (que se pueden considerar como especies clave), las cuales tienen mejores condiciones en el BARB, CL y BL que en el PMC.

Sobre cuáles organismos predominan en suelos tropicales, existen diferentes opiniones. Algunos autores sostienen que las poblaciones de bacterias y actinomicetes son mayores que las de hongos (Acuña *et al.* 2006), mientras que otros han observado que predominan más las bacterias y hay menos hongos y actinomicetes (Vargas y Flores 1996, Stark *et al.* 2007). En este caso de Talamanca, en todos los sistemas evaluados la mayor cantidad de UFC fue de actinomicetes. De todos modos, siempre se reportan más bacterias y actinomicetes que hongos.

4.11 Actividad microbiana

4.11.1 Respiración microbiana

En el CL, CM y BL los valores de respiración microbiana (entre 0,8 y 1,5 mg CO_2-C kg^{-1} suelo h^{-1}) fueron similares en ambas épocas, y se mantuvieron dentro de los rangos observados en otras condiciones: en suelos de fincas bananeras comerciales (convencionales) de Costa Rica que tienen más de 4% de materia orgánica, la respiración microbiana en la mayoría de los casos fue 1 mg CO_2-C kg^{-1} suelo h^{-1}, aunque en algunos casos sobrepasó los 2 mg CO_2-C kg^{-1} suelo h^{-1} (Acuña *et al.* 2006). Según Peña *et al.* (2004) trabajando en zonas tropicales, considera que los valores medios de respiración microbiana pueden estar entre 1,1 y 2 mg CO_2-C kg^{-1} suelo h^{-1}.

La respiración microbiana fue más estable en los suelos de los sistemas agroforestales (CL y BL) y CM que en PMC, ya que estos sistemas presentaron poca variación entre las épocas, lo que muestra un equilibrio en la actividad microbiana de estos sistemas. Otros autores han observado que en

general, en los trópicos, la respiración microbiana es mayor en sistemas agroforestales que en monocultivos (Chander *et al.* 1998). En el valle de Talamanca esto se cumplió en la época seca, pues la respiración microbiana del CL y BL fue mayor que la del PMC. En bosques y barbechos la respiración microbiana está correlacionada negativamente con la humedad debido a que el agua disminuye el flujo de oxígeno (Adachi *et al.* 2006), esta puede ser la razón de que en el BARB se haya registrado menos respiración microbiana en época lluviosa.

La elevada variación de la respiración microbiana entre épocas en el PMC puede explicarse por el uso de herbicidas y fertilizantes sintéticos y por la humedad. El glifosato (i.a. del Roundup) es capaz de estimular la respiración microbiana (Busse *et al.* 2001), la cual puede ser 3 o 4 veces mayor que en suelos sin aplicación de este herbicida (Ratcliff *et al.* 2006). Lugares donde se aplican agroquímicos, especialmente fertilizantes, se consideran zonas de "estrés biológico"; pues al modificar el pH pueden alterar las poblaciones de microorganismos, actividad microbiana y actividad enzimática; con pH ácido hay poca actividad microbiana y baja actividad enzimática (Vargas y Flores 1996). Con pH más neutro ocurriría lo contrario, y eso fue lo que ocurrió en PMC, puesto que su pH promedio fue 6,77. Una mayor humedad del suelo es otro factor clave que estimula la respiración microbiana (Adachi *et al.* 2006).

En el PMC la respiración microbiana en época lluviosa (2,8 mg CO_2-C kg^{-1} suelo h^{-1}) fue casi 5 veces superior a la de época húmeda, y de 2 a 3 veces superior a los de los otros sistemas. Esto se convierte en un problema considerando que en el PMC se reportó la menor cantidad de biomasa microbiana entre todos los sistemas, lo que se traduce en un desequilibrio reflejado por el cociente metabólico y el índice de mineralización del C, esto se explica a continuación.

4.11.2 Cociente metabólico

El cociente metabólico es la relación entre la respiración y la biomasa microbiana, por tanto, es una función de esos dos indicadores. En el presente estudio, los cocientes metabólicos de BARB, CL, CM y BL estuvieron alrededor de 2 µg CO_2-C mg^{-1} C-biom h^{-1}, y fueron similares en ambas épocas. Lo sorprendente fue en el PMC, porque en la época lluviosa su cociente metabólico fue extremadamente alto con 14 µg CO_2-C mg^{-1} C-biom h^{-1}, 14 veces mayor que en la época seca y además sobrepasa cualquier otro valor observado en otros estudios; esto se debió a la elevada respiración microbiana en la misma época y a la baja biomasa microbiana de este sistema. Como ejemplos que sirven para comparar, en suelos de España se han reportado cocientes metabólicos

entre 0,8 y 8,5 µg CO_2-C mg^{-1} C-biom h^{-1} (Peña *et al.* 2004), y en suelos bananeros de Costa Rica entre 1 y 7 µg CO_2-C mg^{-1} C-biom h^{-1} (Acuña *et al.* 2006).

Se considera que valores elevados del cociente metabólico pueden ser indicadores de "estrés de los microorganismos" debido al desequilibrio en el metabolismo fisiológico de la biota del suelo, en suelos en equilibrio se espera que los cocientes metabólicos sean menores (como en el BARB, CL, CM y BL), así se puede decir que los microorganismos están bien adaptados a vivir en esas condiciones (Odum 1985, Peña *et al.* 2004). Variaciones apreciables en el cociente metabólico (como en el PMC) son indicadores de que los sistemas son jóvenes, o no están en equilibrio, con alta tasa de descomposición de la materia orgánica (Stenberg *et al.* 2000). Mientras incrementa el estrés reflejado por el cociente metabólico, los microorganismos desvían la energía del crecimiento para el mantenimiento (Killham 1985, Yan *et al.* 2003). Con base en estas apreciaciones, los resultados del cociente metabólico indican que: en el PMC hay un estrés microbiano, deduciéndose que para la poca cantidad de biomasa microbiana de este sistema la actividad microbiana (reflejada por la respiración) es muy alta; por el contrario, los otros sistemas (BARB, BL, CL, CM) son más estables.

4.11.3 Índice de mineralización del C

Este indicador es la relación entre la respiración microbiana y el C total. Al igual que lo sucedido con el cociente metabólico, el índice de mineralización del C en el PMC (4 % C 10 $días^{-1}$) en la época lluviosa fue significativamente mayor que en la época seca y que en los otros sistemas (que tuvieron alrededor de 1 % % C 10 $días^{-1}$), esto por el mismo motivo: mayor respiración microbiana en PMC en época lluviosa. En suelos bananeros de Costa Rica en la mayoría de los casos el índice de mineralización del C es menor de 2 % 10 $días^{-1}$ (Acuña *et al.* 2006). En otro estudio se reportó 1,85 y 1,66 % 10 $días^{-1}$ en sistemas agroforestales y en monocultivos, respectivamente (Chander *et al.* 1998). Comparando con esos datos, el PMC tiene un elevado índice de mineralización del C en época lluviosa, más del doble. Se supone que mientras más elevado es este índice es mejor, pero un 4 % C 10 $días^{-1}$ en un suelo tropical de PMC, que no tiene cobertura de hojarasca o de otra vegetación como los otros sistemas, no sería adecuado, puesto que la materia orgánica se estaría mineralizando rápidamente y liberando nutrientes, que serían más susceptibles a pérdidas por volatilización y lixiviación, especialmente en la época lluviosa.

4.11.4 Actividad enzimática catalasa

Este es un indicador relacionado con la actividad microbiana, ya que las oxidoreductasas como la catalasa intervienen en la respiración microbiana y ciclos del N y P (Coyne 2000). La actividad de la catalasa estuvo entre 2,9 y 3,7 mmol H_2O_2 g^{-1} h^{-1} y fue similar a otros estudios, por ejemplo, en suelos de cereales de Chile varió de 2,3 a 3 mmol H_2O_2 g^{-1} h^{-1} (Alvear *et al.* 2006), en suelos de cacao orgánico en otra zona de Costa Rica entre 3,16 a 3,5 mmol H_2O_2 g^{-1} h^{-1} (Peña sf) y en suelos de bosques de *Quercus robur* de Galicia entre 0,48 a 6,64 mmol H_2O_2 g^{-1} h^{-1} (Trasar-Cepeda *et al.* 1999). En este caso de Talamanca, fue el CL el que hizo la diferencia, pues presentó menos actividad de la catalasa en la época seca, en los otros sistemas ocurrió lo contrario; la mayor actividad de la catalasa se registró en PMC en época húmeda.

Los mayores valores encontrados en el PMC pueden explicarse al considerar que la actividad enzimática de las oxidoreductasas son superiores en suelos de textura fina que en suelos pesados y son superiores en sistemas convencionales (Bergstrom *et al.* 1999), que tienen aplicación de insumos sintéticos; la aplicación de urea puede incrementar la actividad enzimática, pero se debe tener precaución porque a largo plazo ésta puede disminuir (Strak *et al.* 2007); en los suelos de PMC hay más K, que es regulador de procesos metabólicos y de actividades enzimáticas (Gliessman 2002); y, la actividad enzimática está más relacionada a la fracción lábil de la materia orgánica (Bergstrom *et al.* 1999, Elfstrand *et al.* 2007), como lo serían las hojas y pseudotallos de plátano. En el BARB los valores fueron parecidos a los de PMC y podrían explicarse porque tuvieron similar humedad tanto en época seca como en la lluviosa.

La actividad enzimática depende en parte de la biomasa microbiana, que a su vez es afectada por cambios estacionales (García y Hernández 2003). En varios estudios se encontró correlación significativamente positiva ($p<0,05$) entre actividades enzimáticas (de otras enzimas) y biomasa microbiana (Peña *et al.* 2004). Pero en este estudio, en contraste, la actividad de la catalasa tuvo una correlación negativa y débil con la biomasa microbiana; más bien tuvo más correlación positiva con los nutrientes según lo observado en el biplot de componentes principales.

4.12 Correlaciones entre biomasa microbiana, actividad microbiana y materia orgánica

Se observó que los indicadores de actividad microbiana tienen correlación negativa con la biomasa microbiana y materia orgánica, y se encontró que tienen correlación positiva con pH, P, K, Ca y

Mg. Estudios que concuerdan con estos resultados indican que la biomasa microbiana mantiene correlación positiva con la materia orgánica (Stenberg *et al.* 2000, Chander *et al.* 1998, Stark *et al.* 2007), mientras que la respiración microbiana y cociente metabólico tiende a estar correlacionados negativamente con la biomasa microbiana, C y N (Acuña *et al.* 2006, Adachi *et al.* 2006). Sin embargo, otros estudios difieren con estos resultados, pues indican que no se encontraron correlaciones positivas de la biomasa microbiana con el C total (materia orgánica), bajos valores de respiración microbiana reflejan también bajos contenidos de materia orgánica y el cociente metabólico tuvo correlación negativa con el pH (Yan *et al.* 2003), la actividad enzimática (dehidrogenasa que es del mismo tipo que la catalasa) fue mayor en sistemas agroforestales que en monocultivos y tuvo correlación positiva con la biomasa microbiana (Chander *et al.* 1998, Strak *et al.* 2007), y la actividad enzimática está más correlacionada con la materia orgánica que con la biomasa microbiana y el contenido de N (Bergstrom *et al.* 1999, Elfstrand *et al.* 2007).

Con base en los resultados del presente estudio y las concordancias y diferencias expuestas, se pude decir que todavía no hay similitudes claras de dichas correlaciones en los estudios de indicadores biológicos. En el presente estudio las correlaciones pueden estar influidas por el efecto de aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas sintéticos en el PMC.

4.13 Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) y análisis de conglomerados

Con el MANOVA todos los sistemas fueron diferentes, lo que indica que cada uno de ellos, tomando en cuenta solo los 32 indicadores de calidad de suelos de mayor peso, tiene condiciones diferentes de suelos. Con el análisis de conglomerados, tomando todos los indicadores de calidad de suelos evaluados en este estudio, casi todos los PMC fueron dominantes en un conglomerado y se separaron claramente de los BARB y CL; esto demuestra que por el manejo de monocultivo convencional los indicadores de calidad de suelos son diferentes a barbechos y sistemas agroforestales de CL. Por otra parte, tres sistemas CL formaron un conglomerado con todos los BARB, lo que indica que estos sistemas agroforestales tienen semejanza con un sistema de regeneración que tiene mayor equilibrio y mejor calidad de suelos; esto también se apreció en el biplot de componentes principales, pues el CL estuvo más cerca del BARB.

4.14 Selección de 12 indicadores de mayor peso para determinar calidad de suelos

En este estudio, de los más de 50 indicadores de calidad de suelos utilizados, se seleccionaron 12 indicadores de mayor peso que se recomendarían para determinar calidad de suelos en otros estudios (respiración microbiana, biomasa microbiana, número total de lombrices, total de micoparásitos, actinomicetes, nemátodos fitopatógenos, pH, C total, N total y K, DA y % de agregación). Estos indicadores cumplen con los principales criterios para ser elegido para este tipo de estudios: son generalizables y pueden ser extrapolados a otras escalas o regiones (Karlen *et al.* 1997); reflejan problemas para la producción y son útiles para monitorear cambios por manejo, degradación o contaminación (García y Hernández 2003); están correlacionados con las funciones del suelo, son útiles, comprensibles, y fáciles y accesibles de medir (Doran y Zeiss 2000).

Los 12 indicadores seleccionados, además de ser los de mayor peso, se consideraron claves porque son indicadores de funciones básicas de un suelo de buena calidad. La respiración microbiana es un proceso que refleja en general la actividad biológica (Hernández y García 2003). La biomasa microbiana representa la fracción responsable del flujo de energía, ciclo de nutrientes y regulación de las transformaciones de la materia orgánica (Turco *et al.* 1994); es muy útil para comparaciones temporales y entre tratamientos; y, es más sensitiva a aplicaciones recientes de materia orgánica (Fauci y Dick 1994a). Las lombrices y actinomicetes mejoran la estructura del suelo e intervienen en la descomposición de la materia orgánica. Los micoparásitos tienen la capacidad de controlar microorganismos fitopatógenos. Los nemátodos fitopatógenos reflejan la salud fitosanitaria en el suelo. El C total, N total, K y pH son fundamentales para reflejar la fertilidad del suelo, aunque en cualquier laboratorio ofrecen paquetes de análisis químicos completos y a precios no muy altos, con lo que se puede también tener los demás nutrientes. La DA es muy común y útil en este tipo de estudios y el % de agregación se hace con un método que no es caro y fácil de aprender, ambos reflejan bien el estado físico del suelo.

5. CONCLUSIONES

Con base en el ICSA se concluye que el BARB tiene la mejor calidad de suelos y los sistemas agroforestales (CL y BL), CM y PMC son iguales. El PMC iguala a los sistemas agroforestales y CM en calidad de suelos gracias a la aplicación de fertilizantes sintéticos, sin esa aplicación tendría la menor calidad de suelos, esto refleja el impacto de la fertilización.

Por los análisis univariados y multivariados se concluye que el sistema agroforestal CL es el más parecido al BARB en cuanto a calidad de suelos.

Los sistemas CL, BL Y CM reciben poco manejo y no se aplica ningún tipo de insumos; mientras que en el PMC el manejo es más frecuente y con aplicación de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas sintéticos.

Los suelos del PMC tuvieron mayor contenido de P, K, Ca y Mg que los otros sistemas por la aplicación de fertilizantes sintéticos, pero su contenido de N total fue menor, lo que indica que puede haber pérdidas de este nutriente esencial.

Los suelos de BARB y CL registraron mayor % de materia orgánica y % de N total, lo que indica que en estos sistemas hay mayor y mejor reciclaje de biomasa, y se mantiene mejor el N.

Los suelos de BARB y CL presentaron mejores condiciones de porosidad y aireación, reflejados por la menor DA y mayor % de agregados de 8-2 mm, en comparación con los otros sistemas.

Las poblaciones de microorganismos y lombrices en general y biomasa microbiana fueron mayores en los suelos de BARB y CL. En cuanto a nemátodos no hubo diferencias claras.

En los suelos de BARB, de sistemas agroforestales (CL y BL) y de CM la actividad microbiana fue estable, no se evidenciaron cambios importantes entre las épocas seca y lluviosa. Mientras que en el PMC, en la época lluviosa, se evidenció un desequilibro notorio que puede explicarse por la aplicación de fertilizantes y plaguicidas sintéticos que pueden provocar el “estrés de los microorganismos”.

Los 12 indicadores de calidad de suelos de mayor peso fueron: respiración microbiana, biomasa microbiana, número total de lombrices, total de micoparásitos, actinomicetes, nemátodos fitopatógenos, pH, C total, N total, K, DA y % de agregación.

6. RECOMENDACIONES

Sería de gran importancia hacer un balance de nutrientes para determinar si éste es positivo o negativo en los sistemas agroforestales y en los platanales convencionales, esto podría dar más argumentos sobre la sostenibilidad de los sistemas agroforestales de cacao.

Si se quieren incrementar las producciones de cacao o banano se debería incrementar los contenidos de P y K en el suelo y también encalar el suelo para incrementar el contenido de Ca y corregir la acidez. Pero esto no es suficiente, aunado a esto se recomienda más y mejor manejo de los cacaotales y bananales, especialmente en cuanto a podas, deshojas y control de enfermedades.

En los platanales convencionales se debería replantear el plan de fertilización y aplicación de plaguicidas para el control de enfermedades y plagas que aplican los productores; puesto que en las condiciones actuales hay baja biomasa microbiana y no se permite la estabilización de la actividad microbiana, además que hay indicios de pérdidas de N.

En otros estudios o monitoreos de calidad de suelos donde no se puedan analizar gran cantidad de indicadores por diferentes limitaciones de tiempo o presupuesto, se recomienda utilizar los indicadores de mayor peso propuestos en este estudio.

En posteriores análisis de calidad de suelos, si se cuenta con los medios, sería recomendable determinar la diversidad funcional, que podría ayudar a tener un análisis más completo y determinar sus correlaciones con otros indicadores.

Se recomienda utilizar el % de agregación en posteriores estudios de este tipo, pues demostró ser útil para diferenciar sistemas agroforestales de convencionales y es un método fácil y accesible; que podría ser utilizado como alternativa al fraccionamiento de la materia orgánica que es más complicado.

7. LITERATURA CITADA

Acton, D.F. y L.J. Gregorich. eds. 1995. The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa. 138 p.

Acuña, O; Peña, W; Serrano, E; Pocasangre, L; Rosales, F; Delgado, E; Trejos J; Segura, A. 2006. La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. XVII Reunión Internacional para la cooperación en investigaciones sobre banano en el Caribe y América Tropical, ACORBAT, 15 al 20 de octubre, Joinville-Santa Catarina, Brasil. pp. 222-233.

Adachi M; Sakata Bekku, Y; Rashidah, W; Okuda, T; Koizumi, H. 2006. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. Applied Soil Ecology 34:258-265.

Alvear, M; Pino, M; Castillo, C; Trasar-Cepeda, C; Gil-Sotres, F. 2006. Efecto de la cero labranza sobre algunas actividades biológicas en un alfisol del sur de chile. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición vegetal 6(2):38-53.

Anderson JM; Ingram, JSI. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. 2 ed. UK, CAB International. p 65,68,69.

Andrews, SS; Karlen, DL; Mitchel, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems and Environment 90:25-45.

Araya, M. 1995. Efecto depresivo de ataques de *Radopholus similis* en banano (*Musa* AAA). CORBANA 20(43):3-6.

Arshad, MA; Coen, GM. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. American Journal of Alternative Agriculture 7(1-2):25.31.

Bailey, BA; Lumsden, RD. 1998. Direct effects of *Trichoderma* and *Gliocladium* on plant growth and resistance to pathogens. *In* Harman, GE; Kubicek, CP. eds. *Trichoderma* and *Gliocladium*. Enzymes, biological control and commercial applications. Vol. 2. London, UK, Taylor and Francis Ltd. p. 185-204.

Beer, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffe (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. Agroforestry systems 7:103-114.

Bengtsson, J. 1998. Which species? What kina of diversity? Which ecosystem function? Some problems in studies of relations between biodiversity and ecosystem function. Applied Soil Ecology 10:191-199.

Bergstrom, DW; Monreal, CM; Tomlin, AD; Miller, JJ. 1999. Interpretation of soil enzyme activities in a comparison of tillage practices along a topographic and textural gradient. Canadian Journal of Soil Science 80(1):71-78.

Benzing, A. 2001. Agricultura orgánica: fundamentos para la región andina. Villingen-Schwenningen, AL, Neckar-Verlag. 682 p.

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 157 p.

Bongers, T; Bongers, M. 1998. Functional diversity of nematodes. Applied Soil Ecology 10:239-251.

Borge, C; Castillo R. 1997. Cultura y conservación en la Talamanca indígena. San José, CR, EUNED. 310 p.

Borge, C; Villalobos, V. 1998. Talamanca en la encrucijada. San José, CR, EUNED. 140 p.

Bravo, P; Echenique, J. 2002. Balance nutricional del plátano Harton (Musa AAB) en Yaracuy. Revista de la Facultad de Agronomía (Maracay) 28:131-143.

Briceño, J; Pacheco, R. Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas. San José, Costa Rica, UCR. 41 p.

Buck, C; Langmaack, M; Schrader, S. 2000. Influence of mulch and soil compactation on earthworm cast properties. Applied Soil Ecology 14:223-229.

Busse, MD; Ratcliff, AW; Shestak, CJ; Powers, RF. 2001. Glyphosate toxicity and the effects of long-term vegetation control on soil microbial communities. Soil Biology and Biochemistry 33:1777–1789.

Cambardella, CA; Elliott, ET. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society American Journal. 56:777-783.

Chander, K; Goyal, S; Nandal, DP; Kapoor, KK. 1998. Soil organic matter, microbial biomass and enzyme activities in a tropical agroforestry system. Biology and Fertility of Soils 27:168-172.

Cañizares, C. 2003. Estudio sobre poblaciones de hongos endofíticos provenientes de suelos supresivos al nemátodo barrenador *Radopholus similis* (Cobb) *Thorne* en plantaciones comerciales de plátano en la zona de Talamanca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 75 p.

Coyne, M. 2000. Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. Madrid, ES, Editorial Paraninfo. 416 p.

Das, AC; Mukherjee, D. 2000. Soil application of insecticides influences microorganisms and plant nutrients. Applied Soil Ecology 14:55-62.

Diaz Romeu, R; Hunter A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos, tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, CR, CATIE. 68 p.

Doran, JW; Jones, AJ. eds. Soil Quality and Health: Indicators of Sustainability. *In* Methods for Assessing Soil Quality. Madison, USA, Soil Science Society of America. Special Publication 49:xi-xiv.

Doran, JW; Parkin, TB. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. *In* Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. eds. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison, USA, Soil Science Society of America. Special Publication 35:3-22.

Doran, JW; Sarrantonio, M; Liebig, MA. 1996. Soil Health and Sustainability. Advances in Agronomy 56:1-54.

Doran, JW; Zeiss, MR. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. Applied Soil Ecology 15:3-11.

Elfstrand, S; Hedlund, K; Martensson, A. 2007. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. Applied Soil Ecology 35:610-621.

Elliot, ET. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science of America 50:627-633.

Fauci, MF; Dick, RP. 1994a. Microbial Biomass as an Indicator of Soil Quality: Effects of Long-Term Management and Recent Soil Amendments. *In* Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. eds. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison, USA, Soil Science Society of America. Special Publication 35:229-234.

Fauci, MF; Dick, RP. 1994b. Soil microbial dynamics: short- and long-term effects of inorganic and organic nitrogen. Soil Science Society of America 58:801-806.

Felde zum, A; Pocasangre, L; Sikora RA. 2005. The potential use of microbial communities inside suppressive banana plants for banana root protection. *In* Turner, DW; Rosales, FE. eds. Banana Root System: towards a better understanding for its productive management: Proceedings of an international symposium. INIBAP. Montpellier, FRA. p. 169-177.

Ferris, H; Venette, RC; Scow, KM. 2004. Soil management to enhance bacterivore and fungivore nematode populations and their nitrogen mineralization function. Applied Soil Ecology 25:19-35.

Foley, MF; Deacon, JW. 1985. Isolation of *Pythium oligandrum* and other necrotrophic mycoparasites from soil. Transactions of the British Mycological Society 85:631-639.

Francis, GS; Fraser, PM. 1998. The effects of three earthworm species on soil macroporosity and hydraulic conductivity. Applied Soil Ecology 10:11-19.

García, C; Hernández, T. 2003. Introducción. *In* García, C; Gil, F; Hernández, T; Trasar, C. eds. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos de Suelos: Medidas de actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Madrid, ES, Mundi-Prensa. p. 7-21.

Gliessman, SR. 2002. Agroecología: Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible. Turrialba, CR, CATIE. 359 p.

George, A. 2006. Estudio comparativo de la calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 101 p.

Guiracocha, G; Harvey, C; Somarriba, E; Krauss, U; Carrillo, E. 2001. Conservación de la biodiversidad en sistemas agroforestales con cacao y banano en Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 8(30):7-11.

Hartemink, AE. 2005. Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: a review. Advances in agronomy 86:227-253.

Henríquez, C; Calbalceta, G. 1999. Guía Práctica Para el Estudio Introductorio De Los Suelos Con Un Enfoque Agrícola. San José, CR, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 112 p.

Hernández, T; García, C. 2003. Estimación de la respiración microbiana del suelo. *In* García, C; Gil, F; Hernández, T; Trasar, C. eds. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos de Suelos: Medidas de actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Madrid, ES, Mundi-Prensa. p. 311-346.

Herrick, J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management. Applied Soil Ecology 15:75-83.

Hinojosa, V; Stoian, D; Somarriba, E. 2003. Los volúmenes de negocio y las tendencias de precios en los mercados internacionales de cacao (*Theobroma cacao*) y banano orgánico (*Musa* AAA). Agroforestería en las Américas 10(37-38):63-68.

Fassbender, HW; Beer, J; Heuveldop, J; Imback, A; Enriquez, G; Bonnemann, A. 1991. Ten year balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. Forest Ecology and Management 45:173–183.

Kandeler; E; Tscherko, D; Spiegel, H. 1999. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. Biology and Fertility of Soils 28:343-351.

Kapp, GB. 1989. Perfil ambiental de la zona baja de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, Proyecto de Cooperación Agroforestal CATIE-GTZ-DGF. 100 p.

Karlen, DL; Eash, NS; Unger; PW. 1992. Soil and crop management effects on soil quality indicators. American Journal of Alternative Agriculture 7(1-2):48-55.

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and framework for Evaluation (A Guest Editorial). Soil Science Society of America 61:4-10.

Killham, K. 1985. A physiological determination of the impact of environmental stress on the activity of microbial biomass. Environmental Pollution Series A 38:283-294.

Kirkby, M; Powlson, D. 2004. Introduction: linkages and research priorities. Agriculture, Ecosystems and Environment 104:245-247.

Larson, WE; Pearce, FJ. 1994. The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management. *In* Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. eds. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison, USA, Soil Science Society of America. Special Publication 35:37-52.

Leandro, LFS; Guzman, T; Ferguson, LM; Fernandez, GE; Louws, FJ. 2007. Population dynamics of Trichoderma in fumigated and compost-amended soil and on strawberry roots. Applied Soil Ecology 35:237-246.

Maldonado, F; Jasso, J; Palma-López, D; Salgado, S; Gonzáles, V. 2006. Dinámica de materia orgánica, P y K en suelos de sistemas agroforestales "cedro-plátano" en Tabasco, México. Revista Fitotecnia Mexicana 29(3):223-230.

Marschner, P; Kandeler, E; Marschner, B; 2003. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. Soil Biology and Biochemistry 35:453–461.

Meléndez, G. 1997. Transformaciones de carbono, nitrógeno y fósforo del suelo, en sistemas agroforestales, cultivos anuales y bosque natural. Thesis Mag. Sc. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 105p.

Mena, M. 2001. Clima de Costa Rica. Consultado 10 de octubre de 2006. Disponible en http://www.imn.ac.cr/educa/clima/clima%20en%20costa%20rica.htm

Nielsen, MN; Winding, A. 2002. Microorganisms as Indicators of Soil Health. National Environmental Research Institute, Denmark. Technical Report no. 388. 82 p.

Odum, EP. 1985. Trends expected in stressed ecosystems. Bioscience 35:419-422.

Papavizas, GC. 1985. Trichoderma and Gliocladium: biology, ecology and potential biocontrol. Annual Review of Phytopathology 23:23-54.

Peña, W; Alfaro, MP, Leirós de la Peña, MC. 2004. Indicadores bioquímicos para la calidad de suelos forestales desarrollados sobre serpentinitas en Galicia, España. I Congreso nacional de suelos forestales UNISEFOR/UNA, Heredia, CR.

Peña, W. sf. Propiedades bioquímicas en suelos de agricultura orgánica al norte de Costa Rica. Monografía Laboratorio Bioquímica Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), San José, CR.

Porras, CM. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales en café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 131 p.

Oliveira de, J; Valle, RR. 1990. Nutrient cycling in the cacao ecosystem: rain and throughfall as nutrient sources for the soil and the cacao tree. Agriculture, Ecosystems and Environment 32:143-154.

Ratcliff, AW; Busse, MD; Shestak, CJ. 2006. Changes in microbial community structure following herbicide (glyphosate) additions to forest soils. Applied Soil Ecology 34:114-124.

Ribó, M; Canet, R; Albiachi, MA; Pomares, F. 2003. Mineralización del Nitrógeno en el suelo. *In* García, C; Gil, F; Hernández, T; Trasar, C. eds. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos de Suelos: Medidas de actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Madrid, ES, Mundi-Prensa. p. 347-367.

Schroth, G. 2003. Decomposition and Nutrient Supply from Biomass. *In* Schroth, G; Sinclair, F.L. eds. Trees, Crops and Soil Fertility: Concepts and Research Methods. Cambridge, MA, USA, CABI. p. 131-150.

Schroth, G; Lehmann, J; Barrios, E. 2003. Soil Nutrient Availability and Acidity. *In* Schroth, G; Sinclair, F.L. eds. Trees, Crops and Soil Fertility: Concepts and Research Methods. Cambridge, MA, USA, CABI. p. 93-130.

Somarriba, E. 1999. Diversidad Shannon. Agroforestería en las Américas 6(23):72-74.

Somarriba, E; Harvey, C. 2003. ¿Cómo integrar producción sostenible y conservación de biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas? Agroforestería e las Américas 10(37-38):12-17.

Somarriba, E. 2004. ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? Agroforestería en las Américas no.41-42:122-130.

Soto, G; García, L; Murguía, R; Haggar, J; de Melo, E; Barrios, M; Staver, Ch; Frey, S. 2007. Impact of conventional and organic coffee agroforestry systems on soil characteristics in an Andisol in Masatepe, Nicaragua and an Ultisol in Turrialba, Costa Rica. *In* Second International Symposium. Multistrata Agroforestry Systems with Perennial Crops: Making ecosystems count for farmers, consumers and environment. September 17-21, Turrialba, Costa Rica.

Stanford, G; Smith, SJ. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36:465–472.

Stark, C; Condron, LM; Stewart, A; Di, HJ; O'Callaghan, M. 2007. Influence of organic and mineral amendments on microbial soil properties and processes. Applied Soil Ecology 35:79-93.

Stenberg, M; Stenberg, B; Rydberg, T. 2000. Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. Applied Soil Ecology 14:135-145.

Trasar-Cepeda, C; Camiña, F; Leirós, MC; Gil-Sotres; F. 1999. An improved method to measure catalase activity in soils. Soil Biology and Biochemistry 31:483-485.

Trasar, C; Gil, F; Leirós, MC. 2003. Determinación de la actividad cátalas del suelo. *In* García, C; Gil, F; Hernández, T; Trasar, C. eds. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos de Suelos: Medidas de actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Madrid, ES, Mundi-Prensa. p. 229-244.

Turco, RF; Kennedy, AC; Jawson, MD. 1994. Microbial Indicators of Soil Quality. *In* Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. eds. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison, USA, Soil Science Society of America. Special Publication 35:73-90.

Vargas, JL. 1990. Prácticas agrícolas indígenas sostenibles en áreas del bosque tropical húmedo en Costa Rica. Geoistmo 4(1-2). 94 p.

Vargas, R; Flores, CL. 1996. Fluctuaciones poblacionales en microorganismos en suelos dedicados al cultivo de banano (*Musa* AAA). CORBANA 21(45):11-18.

Vilas O. 1991. Descomposición de hojarasca y mineralización del nitrógeno de la material orgánica del suelo bajo cuatro sistemas agroforestales. Thesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 152 p.

Visser, S; Parkinson; D. 1992. Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms. American Journal of Alternative Agriculture 7(1-2):33-37.

Weaver, F; Angle, J; Bottomley, P. 1994. Methods of soil analysis. Part Microbiological and biochemical properties. Number 5. Soil Science Society of American Book Series. USA.1121p.

Whelan, MP. 2005. Reading the Talamanca landscape: Land Use and Livelihoods in the Bri Bri and Cabécar Indigenous Territories. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 123 p.

Yan, T; Yang L; Campbell, CD. 2003. Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in the Three Gorges Reservoir area. Geoderma 115:129-138.

Zibilske, LM. 1994. Carbon Mineralization. Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties-SSSA Book Series, no.5:857-858.

ANEXO 1. FORMATO DE LA ENCUESTA

Fecha: _____ Nombre del encuestador: _____

Nombre del propietario de la finca:_____

Comunidad: _____ Área total de la finca: _____ha

Pertenece a alguna asociación de productores? SI NO Cual? _____

SISTEMA EVALUADO: _____

Área:____ha Variedad del cultivo: _____

Distancia de siembra: _____m Edad: ___años

HISTORIAL DEL SISTEMA EVALUADO

Cómo habilitó el terreno para la siembra? _____

Aplicaba agroquímicos? SI/NO Cuáles?_____

Historial del uso de suelo

Años	Cultivo	Años	Cultivo	Años	Cultivo

PRINCIPALES PROBLEMAS PARA LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO

1._____

2. _____

3. _____

4. _____

MANEJO DEL SISTEMA

Quién lo maneja: el dueño ☐ otro (s): _____

Práctica	**Frecuencia**	**Meses**	**Insumos**	**Dosis**	**Forma de aplicación**

PLAGAS Y/O ENFERMEDADES EN EL CULTIVO

Plaga o enfermedad	Qué parte de la planta afecta	En qué meses hay mayor incidencia	Controla SI/NO Cómo?

RENDIMIENTOS

Rendimiento de la última cosecha (año pasado): _____

Cuánto fue el rendimiento más bajo: _____

Cuánto fue el rendimiento más alto: _____

Cuánto es el rendimiento más frecuente: _____

INFORMACIÓN SOBRE EL CONOCIMIENTO DE SUS SUELOS

Considera que su suelo es bueno? SI/NO

Partes buenas: _____

Partes malas: _____

Cuáles cree que son las principales limitantes de su suelo? _____
_____

Hace labores de conservación o mejoramiento de suelos? SI/NO Cuáles? _____
_____

Hizo análisis de sus suelos? SI/NO cuándo? _____

Considera que los árboles de sombra son buenos para el suelo? SI/NO

Partes buenas: _____

Partes malas: _____

Considera que los árboles de sombra son buenos para las plantas? SI/NO

Partes buenas: _____

Partes malas: _____

Frecuencia de inundación: _____ Última inundación:_____

Observaciones: _____
_____

ANEXO 2. Análisis de fertilidad de suelos

La extracción de P, K, Cu, Mn, Zn se hizo con el método Olsen modificado, pH 8,5, relación 2.5:25 (suelo: solución); para Ca, Mg y acidez extraíble se hizo con KCl 1 N. La lectura de P se hizo con el método colorimétrico que utiliza como indicador al azul de molibdeno y la determinación de los demás elementos (K, Cu, Mn, Zn, Ca y Mg) mediante espectroscopia por absorción atómica; para determinar la acidez extraíble se hizo una titulación con solución estandarizada de NaOH 0.01 N (Díaz Romeu y Hunter 1978). El pH se determinó con pH-metro en agua. El C total y N total se determinaron con el método de combustión en equipo autoanalizador (Briceño y Pacheco 1984).

ANEXO 3. Fraccionamiento de materia orgánica

Este fraccionamiento se hizo con la metodología descrita por Cambardella y Elliott (1992). Las muestras se pasaron por un tamiz de 4 mm para separar piedras y ramas, luego por un tamiz de 2 mm. Después se pesaron 25 g de suelo en frascos de centrífuga de 250 ml, se adicionó 100 ml de la solución de hexametafosfato de sodio de concentación 5 g l^{-1}. Al mismo tiempo se pesó una muestra para la determinación de humedad. Los frascos de centrífuga se agitaron por 1 hora en agitador horizontal, luego se pasó la suspensión por un tamiz de 53 µm, pasando todas las partículas del frasco al tamiz con ayuda de una pizeta con agua destilada. Luego se pasó el material que queda retenido en el tamiz (arena más macromateria) a un beaker previamente pesado y se dejó secar ambas fracciones a 50º C en una estufa con recirculación de aire. Una vez secas las fracciones, se pesaron los beakers para determinar la cantidad de material en cada fracción. El material seco de ambas fracciones se morterizó y se paso por un tamiz de 250 µm para el análisis de carbono orgánico. Aparte se determinó el contenido de carbono orgánico de la muestra original.

ANEXO 4. Densidad aparente (DA)

En los sistemas agroforestales se ubicaron tres puntos: uno en medio de dos laureles, otro cerca (1 m) de un cacao o de una planta de banano y otra cerca de un laurel. En las parcelas sin sombra los tres puntos se tomaron al azar. En cada punto se apartó la hojarasca u otros tipos de cobertura del suelo, ahí se introdujeron cilindros metálicos de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro aproximadamente, una vez que estaban llenos de suelo se los sacó con la ayuda de una pala, luego con una espátula se eliminó el suelo que sobrepasaba los bordes del cilindro, después se sacó el suelo del cilindro y se lo colocó en bolsa plástica, y se rotuló la muestra con el código. En el laboratorio el suelo de cada muestra se secó a 105ºC por 24 horas, luego se tomó el peso seco y se dividió ese valor entre el valor del volumen del cilindro para obtener la DA, expresada en g cc^{-1} (Henríquez y Cabalceta 1999).

ANEXO 5. % de agregación del suelo (estructura)

En este estudio se hizo el fraccionamiento de materia orgánica, pero este método trabaja con suelo menor a 2 mm (Cambardella y Elliott 1992), y no toma en cuenta a los agregados más grandes; es por eso que también se hizo el % de agregación del suelo (estructura) en 4 diferentes tamaños, donde se toma suelo desde 8 mm para abajo.

Se utilizaron muestras de 0-5 cm de profundidad. Se hizo la separación de agregados de acuerdo con la metodología de Elliot (1986) para obtener cuatro tamaños de agregados. Se utilizó una muestra de 100 g de suelo que fue mojada con agua corriente y se pasó por tamices de 8 mm, 2 mm, 250 um y 53 um. El suelo que quedó en los tamices de 2 mm, 250 um, 53 um y el que pasó por este último

tamiz fue secado en diferentes bandejas por 5 días dentro de un horno con flujo de aire a 65ºC, luego fue pesado; así se obtuvieron los % de suelo en los cuatro tamaños deseados: % 8-2 mm, % 2 mm-250µm, % 250-53 µm y % < 53 µm, Las muestras de cada tamaño de agregado también se ingresaron al laboratorio del CATIE para determinar el C en cada uno de ellos.

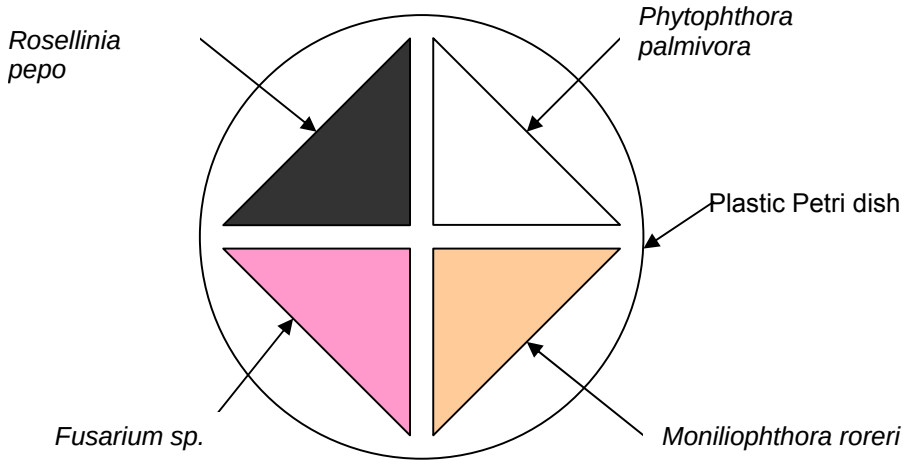
ANEXO 6. Recuento e identificación de hongos, bacterias y actinomicetes

Se utilizó el método de determinación de poblaciones de microorganismos del suelo mediante técnicas de recuento (Weaver 1994). Se tomaron 5 g de la muestra de suelo, se colocó el suelo en un *erlenmeyer* con 45 ml de agua estéril, y se agitó a 120 rpm por 15 minutos para obtener una dilución de 10^{-1} (solución madre). Luego, en cámara de flujo laminar, se tomó con una pipeta graduada 1 ml de la solución madre y se añadió a un tubo de ensayo con 9 ml, esa fue la dilución 10^{-2}, después se hicieron disoluciones en otros tubos hasta tener la disolución 10^{-6}. Para la inoculación de los hongos se utilizaron las disoluciones 10^{-3} y 10^{-4} en el medio de cultivo PDA (papa – dextrosa - agar) acidificado y con antibiótico. Para los otros microorganismos se utilizaron las diluciones 10^{-5} y 10^{-6}; para bacterias se usó el medio de cultivo Agar Nutritivo y para actinomicetes el medio específico *Actinomycete Isolation Agar*. Para cada microorganismo y dilución se inocularon dos placas que se incubaron por 5 días a 25 ºC; pasado ese tiempo se contaron las unidades formadoras de colonias (UFC) y se identificaron los microorganismos y se registró la frecuencia de aparición de los microorganismos con el fin de reaislarlos e identificarlos a nivel de géneros y si es posible especie.

Las UFC se expresaron en número de UFC g^{-1} de suelo seco, utilizando la siguiente fórmula:
UFC = (UFC x C)/PS Donde: UFC = UFC contadas en la placa petri; C = concentración de la dilución; y PS = peso seco de la muestra de suelo.

ANEXO 7. % de colonización e identificación de micoparásitos

Se utilizó la metodología (modificada) de Foley y Diacon (1985) descrita por George (2006). Se utilizaron cuatro cepas de hongos fitopatógenos de la colección de CABI en CATIE como cebo: *Phytophthora palmivora* PP001, *Fusarium* sp. AMR02, *Moniliophthora roreri* MR06 y *Rosellinia pepo* RBO003. Éstos crecieron en platos petri con medio de cultivo Papa Dextrosa Agar, incubados a 25ºC por 2 semanas en la oscuridad. Luego cada colonia se cortó en cuatro partes (cuadrantes), y un cuadrante de cada hongo fue transferido a un nuevo plato petri. Para cada sistema se prepararon tres repeticiones. En cada cuadrante se espolvorearon 0,05 g de suelo, el plato petri fue sellado con parafilm e incubado por 9 días a 25ºC en la oscuridad. Finalmente, se anotó la presencia o ausencia de micoparásitos sobre cada cuadrante, los micoparásitos presentes se identificaron con base en características morfológicas y los resultados se expresaron en porcentaje.



ANEXO 8. Respiración microbiana

Se utilizó la metodología propuesta por Zibilske (1994). Se pesaron 12,5 g de suelo fresco en envase plástico y simultáneamente otra cantidad para determinar la humedad. Luego se colocó el envase plástico con el suelo en un frasco con cierre hermético que contenía 20 ml de la solución de NaOH 0.10N y se cerró; se preparó un "blanco" que no contenía suelo. Se dejó incubar a 25ºC 24 horas. Pasado este tiempo se sacó el envase que contenía el suelo, se adicionó a la solución de NaOH en el frasco 3 ml de la solución de $BaCl_2$, 3 gotas de fenolftaleína y se tituó con una solución de HCl 0.50N hasta el cambio de color de rosado a incoloro. De igual forma se tituló el "blanco". El volumen del HCl consumido equivale a la cantidad de NaOH no consumido.

Los resultados se calcularon con las fórmulas que se presentan a continuación, para expresar en unidad de tiempo se dividió entre las horas de incubación.

$$\mathbf{mgCO_2\ kg^{-1} = (V_{bl}-V_m)*NHCl*22*1000\ /\ (masa\ suelo\ seco)}$$

ó

$$\mathbf{mgCO_2\text{-}C\ kg^{-1} = (V_{bl}-V_m)*NHCl\ *6*1000/\ (masa\ suelo\ seco)}$$

Donde: V_{bl} = Volumen de HCL consumido por el blanco; V_m = Volumen de HCL consumidos por la muestra; NHCl = Normalidad del HCl; 22 = peso equivalente del CO_2; 6 = peso equivalente del C.

ANEXO 9. Biomasa microbiana

Se utilizó el método de fumigación-incubación propuesto por Anderson e Ingram (1993). El suelo fresco se tamizó por 4 mm para separar piedras y ramas. Se pesaron tres submuestras de 10g de suelo húmedo; también se pesó otra cantidad para determinar la humedad. Dos submuestras se colocaron en *beakers* de 50 ml para ser fumigadas, la tercera submuestra se colocó en un tubo de centrifuga plástico de 100 ml para extracción posterior con 50 ml de K_2SO_4 0.5 M. En el fondo de una desecadora de vidrio con llave de vacío (para la fumigación) se colocó papel toalla humedecido y luego una caja petri con cloroformo en una relación de 1 ml por 10 g de muestra con unas perlas de ebullición; luego se colocarón las muestras de suelo pesadas en los *beaker* de 50 ml, se cerró herméticamente y se aplicó vacío hasta que se observo ebullir el cloroformo por al menos 5 minutos. Después se tapó la desecadora con plástico negro y se dejó en incubación por 48 horas. Pasado ese tiempo, se extrajo el cloroformo que había quedado y se aplicó vacío a la desecadora para eliminar el exceso de cloroformo existente; se repitió esto varias veces para asegurarse que se eliminaron los restos de cloroformo. Luego las muestras de suelo se pasaron a tubos de centrifuga de 100 ml para la extracción del carbono con Sulfato de Potasio 0.5 M.

Para la extracción del carbono microbiano a la muestra de 10 g de suelo se le adicionó 50 ml de solución de K_2SO_4 0.5 M y se agitó en agitador horizontal por 30 minutos. Después se centrifugó por 5 minutos a 3000 rpm y se filtró el extracto por papel filtro Whatman #42. Los extractos se guardaron en botellas plásticas de 50 ml para la determinación de C con equipo autoanalizador antes y después de la incubación.

El cálculo del C de la biomasa microbiana se hizo con la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Biomasa\ Microbiana\text{-}C = (C\ Tf - C\ Ti) * 2.64}$$

Donde: C Tf = C extraído después de la incubación; C Ti = C extraído antes de la incubación

ANEXO 10. Actividad enzimática de la catalasa

Se utilizó la metodología de Jonson y Temple (1964) descrita por Trasar *et al.* (2003). Primer paso (muestra): se pesaron 0,5 g de suelo en húmedo (como viene de campo; se determinaron la humedad y relación suelo seco/suelo húmedo para posterior cálculo final de la actividad enzimática); se añadieron 40 ml de agua destilada, se agitó durante 30 minutos; luego se añadieron 5 ml de H_2O_2 (1:100) y se agitó durante 10 minutos y después se añadieron 5 ml de H_2SO_4 1,5M, por último se filtró todo. Segundo paso (control): se hizo lo mismo que lo anterior pero se sustituyó los 5 ml H_2O_2 por 5 ml de H_2O destilada. Tercer paso (blanco): igual al primer paso (A) pero sin utilizar muestra de suelo.

Para las mediciones: se tomó una alícuota de 25 ml del extracto del primer paso, se valoró con $KMnO_4$ 0,01M (concentración conocida). El punto final de valoración lo señaló la aparición del primer color rosado de forma permanente, hay que tener cuidado al observar el cambio de color ya que las primeras gotas de permanganato se decoloran lentamente pero luego la reacción se hace más rápida hasta el cambio de color. Se valoraron de igual forma el control y el blanco. Después de sustraer a las muestras el volumen gastado en la valoración de los blancos se calculó, por diferencia con la concentración inicial de peróxido de hidrógeno, la concentración de H_2O_2 consumido y, por tanto, la del O_2 desprendido en la reacción enzimática, que sería igual a la mitad del peróxido consumido.

Cálculos: **Actividad Catalasa = ((C-(A-B)) * N * 0,5 * (50/25) * 6) / S**

A = volumen gastado en muestra; B= volumen gastado en control; C= volumen gastado en blanco; N = concentración exacta del $KMnO_4$; 0,5 = valor constante (cantidad de Peróxido que reacciona con permanganato en mmoles (PM/valencia/1/PMperóxido); 50/25 = factor dilución, toma de alícuota; 6 = factor de tiempo, incubación de 10 minutos; S = factor de 0,5 * (ss/sh), relación cantidad de suelo seco que hay en 0,5 g suelo húmedo

ANEXO 11. Recuento de lombrices

Se hizo el recuento de lombrices pequeñas (0-3 cm), medianas (3-6 cm), grandes (>6 cm) y del número total con la expectativa de encontrar diferencias significativas para cada tamaño y poder relacionar esto con el manejo de los sistemas. Además, no es igual encontrar, por ejemplo, 20 lombrices de las cuales 15 sean grandes en un sistema, que encontrar en otro sistema también 20 lombrices, pero que de las cuales 15 sean pequeñas; la biomasa sería diferente y también el efecto de la actividad de lombrices por el tamaño. En cada parcela de estudio se ubicaron tres puntos (sitios) con el mismo criterio usado para la toma de submuestras para DA. En cada sitio se hizo un recuento físico de lombrices. Con una pala se extrajo un bloque de suelo de 50 x 50 cm (0,25 m^2) y 10 cm de profundidad y luego se contaron las lombrices de acuerdo a tres tamaños: pequeñas (0-3 cm), medianas (3-6 cm) y grandes (>6 cm).

ANEXO 12. Biomasa de hojarasca

En cada parcela de estudio se tomaron tres submuestras en sitios ubicados con el mismo criterio usado para DA y recuento de lombrices. Se colocó un marco de 50 x 50 cm, toda la hojarasca y restos vegetales (hasta ramas de 1 cm de diámetro) dentro del marco se recogieron y se guardaron en bolsas plásticas; luego se pasaron a bolsas de papel y se secaron en horno con flujo de aire a 65 ºC por 48 horas para hallar el peso seco (Porras 2006).

ANEXO 13. Análisis discriminante. Funciones discriminantes - datos estandarizados con las varianzas comunes

Análisis con todos los indicadores	1	2
Respiración	0,82	0,70
Biom. Microb.	0,95	-0,49
%Ctotal(5cm)	2484,48	1469,41
% MO (5cm)	-2517,32	-1470,09
QCO2 - C	0,89	-4,68
Indice mineralzación C	-1,67	4,02
Catalasa	-0,31	0,11
LomPeq/m2	806,25	322,77
LomMed/m2	746,82	299,16
LomGran/m2	630,02	252,42
LomTotal/m2	-1701,76	-681,72
Nem Fitop	0,01	1,11
Nem sapros	-0,45	0,32
H Nem Fitop	-0,38	0,13
UFC Bacterias	0,02	0,05
UFC Hongos	-0,46	0,97
UFC Actinomycetes	0,01	-0,27
H Hongos	0,45	0,25
%Trichoderma	-0,07	-2,92
%Clonostachys	-0,62	-2,79
%TotalMicop	0,16	4,71
Hoj. kg/ha	-1,18	-0,68
pH	-27,49	4,20
Acidez cmol(+)/l	25,44	-3,83
Ca cmol(+)/l	-29,10	-3,37
Mg cmol(+)/l	-22,35	4,18
K cmol(+)/l	-12,20	-3,08
P mg/l	19,77	2,71
Cu mg/l	-14,44	-1,22
Zn mg/l	52,28	1,89
Mn mg/l	-10,90	-3,19
Fe mg/l	-53,83	1,86
% N	-30,07	-66,74
% C (20cm)	-304,76	-275,14
% MO (20cm)	355,75	348,47
C/N	-25,03	-20,04
Dap (g/cc)	-20,15	0,76
%suelo 8-2mm	-13301,70	2257,81
%suelo 2mm-250um	-9851,55	1661,89
%suelo 250-53um	-11637,70	1967,12
%suelo <53um	-3821,66	642,72
g C 8-2mm/100g	-72,09	6,97
g C 2mm-250um/100g	45,92	4,88
g C 250-53um/100g	3,31	6,74
g C <53um/100g	1,78	-0,92
% FF	-138,49	-26,94
% FG	-136,52	-25,40
g C FF(<53um)/100g s	-7,39	-8,37
g C FG(>53um)/100g s	-10,20	-8,15

Análisis solo con indicadores biológicos	1	2
Respiración	-0,96	-0,42
Biom. Microb.	-1,01	-0,01
QCO2 - C	-1,91	0,57
Ind. Min.	2,20	0,21
Catalasa	-0,11	0,20
LomPeq/m2	429,39	312,97
LomMed/m2	397,32	288,56
LomGran/m2	335,06	243,05
LomTotal/m2	-905,74	-658,35
Nem Fitop	0,62	-0,35
Nem sapros	-0,06	-0,07
H Nem Fitop	0,18	0,21
UFC Bacterias	-0,05	-0,02
UFC Hongos	0,12	0,38
UFC Actinomycetes	0,28	0,11
H Hongos	-0,28	0,58
%Trichoderma	0,70	0,62
%Clonostachys	0,54	0,57
%TotalMicop	-0,94	-1,03
Hoj. kg/ha	-0,46	-0,05

Análisis solo con indicadores físicos	1	2
DA (g/cc)	-0,59	0,16
%suelo 8-2mm	342,05	334,23
%suelo 2mm-250um	251,70	246,69
%suelo 250-53um	298,17	292,62
%suelo <53um	98,00	95,78
% FF	18,57	6,79
% FG	18,48	5,79

Análisis solo con indicadores químicos	1	2
pH	-1,14	1,18
Acidez cmol(+)/l	1,49	-0,40
Ca cmol(+)/l	0,90	2,57
Mg cmol(+)/l	-1,20	1,66
K cmol(+)/l	0,68	0,41
P mg/l	-0,65	-0,42
Cu mg/l	0,95	0,54
Zn mg/l	0,85	-2,74
Mn mg/l	1,22	0,76
Fe mg/l	-0,60	1,76
% N	12,65	0,02
% MO (20cm)	-13,82	-0,57
% MO (5cm)	-0,19	1,54
g C 8-2mm/100g	-2,31	0,51
g C 2mm-250um/100g	-1,34	-0,81
g C 250-53um/100g	-1,50	-1,46
g C <53um/100g	0,20	0,84
g C FF(<53um)/100g s	1,61	0,81
g C FG(>53um)/100g s	2,56	0,28
C/N	3,93	0,78