

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



**CALIDAD DE SUELOS EN DIFERENTES SISTEMAS DE USO EN SUPTE SAN
JORGE – TINGO MARÍA**

Tesis para optar el título de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Mención: Conservación de Suelos y Agua

Presentado por:

MARÍA OFELIA HOSOKAY OLIVEROS

2012



T
CSA

Hosokay Oliveros, María Ofelia

Calidad de suelos en diferentes sistemas de uso en Supte San Jorge - Tingo María - 2012

99 páginas; 21 cuadros; 27 fgrs.; 52 ref.; 30 cm.

Tesis (Ing. Recursos Naturales Renovables Mención: Conservación de Suelos y Agua) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables.

- 1. SISTEMAS DE USOS DEL SUELO**
- 2. CALIDAD DEL SUELO**
- 3. PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO**
- 5. SUELO DEGRADADO**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 20 de julio del 2012, a horas 4:00 p.m. en la Sala de Grados de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para calificar la Tesis titulada:

“CALIDAD DE SUELOS EN DIFERENTES SISTEMAS DE USO EN SUPTTE SAN JORGE – TINGO MARÍA”

Presentado por la Bachiller: **MARÍA OFELIA HOSOKAY OLIVEROS**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, la sustentante queda apta para optar el Título de **INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**, mención **CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del Título correspondiente.

Tingo María, 21 de abril del 2014.

Ing. M.Sc. **LUCIO MANRIQUE DE LARA SUÁREZ**
PRESIDENTE

Ing. **JAIME TORRES GARCÍA**
VOCAL

Ing. M.Sc. **ROBERTO OBREGÓN PEÑA**
VOCAL

Ing. M.Sc. **NELINO FLORIDA ROFNER**
ASESOR

DEDICATORIA

A mi Dios, por haberme dado la vida, guiarme por el buen camino y por no desampararme.

Con todo mi cariño y mi amor a mis queridos padres Hilario Hosokay Kuriyama y Luz Ofelia Oliveros de Hosokay, que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A mi amado esposo Jorge Luis Hidalgo Sarria por su amor incondicional, paciencia, apoyo constante y fuente de perseverancia, gracias por estar siempre a mi lado.

A mí adorada hija Dayana Fátima Hidalgo Hosokay, por su afecto y amor que son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ti, aún a tu corta edad me has enseñado y me sigues enseñando muchas cosas de esta vida. Fuiste mi motivación más grande para concluir con esta tesis.

A mis hermanos: Jesús Antonio, José Antonio y Takenori Hiroquichi, por el amor que les tengo.

A mi abuelita Ana María Reyna Guevara, que aunque no esté acá físicamente, sus sabios consejos siempre me guiarán y así estará viva en mi corazón.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. MSc. Nelino Florida Rofner, patrocinador del presente trabajo de investigación.

Al Ing. MSc. Hugo Huamaní Yupanqui, co patrocinador del presente trabajo de investigación.

Al Ing. MSc. Lucio Manrique De Lara Suarez por su valiosa guía y aporte de sus conocimientos profesionales.

Al Ing. Jorge Luis Hidalgo Sarria, por su colaboración y apoyo profesional en la elaboración del presente trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), por ser el alma mater que me brindó la oportunidad para formarme como profesional.

A los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, por influir con sus lecciones y experiencias en mi formación profesional.

Al profesor Jorge Hidalgo Sifuentes, por su colaboración en la redacción de la presente tesis.

A mis compañeros de aulas y a mis amigas Carmen De la Cruz Alvarez, Jakeli Ríos Gonzales, Rosie Mogollón Saldaña, Evelyn Ruiz Gonzales y Patricia Gavidia Da Cruz, por compartir momentos gratos durante mi etapa universitaria.

A todas las personas que de alguna forma influyeron en mi formación profesional y en la realización de la presente tesis.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	01
II. REVISIÓN DE LITERATURA	04
2.1. El suelo.....	04
2.2. Calidad de suelo.....	06
2.3. Indicadores de calidad del suelo	09
2.3.1. Indicadores Físicos.....	12
2.3.1.1. Textura del suelo.....	14
2.3.1.2. Resistencia del suelo a la penetración	17
2.3.1.3. Estabilidad estructural	21
2.3.2. Indicadores químicos.....	24
2.3.2.1. Materia orgánica.....	24
2.3.2.2. Fósforo.....	27
2.3.3. Indicadores biológicos.....	31
2.3.3.1. Respiración microbiana.....	32
2.3.3.2. Fauna del suelo.....	37
III MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. Ubicación del campo experimental	43
3.2. Características generales de la zona.....	43
3.2.1. Clima.....	43
3.2.2. Geología.....	44
3.2.3. Fisiografía y pendiente.....	44
3.3. Análisis estadístico	44

3.3.1.	Sistema.....	45
3.3.2.	Características físicas del suelo.....	46
3.3.3.	Propiedades químicas del suelo.....	46
3.3.4.	Características biológicas del suelo.....	46
3.3.5.	Diseño experimental.....	46
3.4.	Metodología	47
3.4.1.	Descripción de los sistemas de uso de suelo.....	47
3.4.1.1.	Sistema de uso bosque secundario.....	47
3.4.1.2.	Sistema de uso con cacao.....	47
3.4.1.3.	Sistema de uso con plátano.....	47
3.4.1.4.	Sistema de uso con maíz.....	47
3.4.1.5.	Sistema de uso con pasto.....	48
3.4.1.6.	Sistema de uso con coca.....	48
3.4.1.7.	Sistema de uso extremadamente degradado	48
3.4.2.	Evaluaciones.....	49
3.4.2.1.	Propiedades del suelo.....	49
3.4.2.1.1.	Propiedades físicas.....	50
	a. Textura.....	50
	b. Resistencia a la penetración.....	52
	c. Inestabilidad estructural.....	52
3.4.2.1.2.	Propiedades químicas.....	53
	a. Fósforo.....	53
3.4.2.1.3.	Propiedades biológicas.....	54
	a. Materia orgánica.....	54

	b. Respiración microbiana.....	55
	c. Fauna del suelo.....	56
	c.1. Densidad.....	57
	c.2. Índice de diversidad de especies.....	57
	1.4.2.1.4. Aporte de biomasa.....	58
	a. Biomasa arbustiva/herbácea.....	58
	b. Biomasa de hojarasca	59
IV	RESULTADOS	60
4.1.	Propiedades físicas y químicas del suelo.....	60
4.1.1.	Textura en los diferentes sistemas de uso del suelo....	60
4.1.2.	Resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	61
4.1.3.	Inestabilidad estructural en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	63
4.1.4.	Contenido de fósforo (p) en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	64
4.2.	Propiedades biológicas del suelo.	66
4.2.1.	Contenido de materia orgánica.....	66
4.2.2.	Respiración microbiana.....	68
4.2.3.	Cantidad de macrofauna en los sistemas de uso del suelo.....	70
4.3.	Relación entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	73

V.	DISCUSIONES.....	75
VI	CONCLUSIONES.....	83
VII	RECOMENDACIONES.....	86
VIII.	ABSTRACT.....	87
IX	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
	ANEXO.....	98

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Propiedades de los diferentes tipos de suelo.....	15
2. Niveles de resistencia de suelo a la penetración.....	21
3. Nivel de materia orgánica en el suelo.....	26
4. Niveles críticos de fósforo en el suelo.....	31
5. Fuentes de variación de análisis de varianza y grados libertad en estudio.....	45
6. Distribución de las variables en estudio.....	46
7. Contenido de arena, limo, arcilla (%) en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	60
8. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	61
9. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	61
10. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la inestabilidad estructural en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	63
11. Análisis de varianza de la inestabilidad estructural en los diferentes sistemas del uso de suelo.....	63
12. Análisis de varianza del contenido de fósforo en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	54 64
13. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de fósforo en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	65
14. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de materia orgánica en los	

diferentes sistemas de uso del suelo	66
15. Análisis de varianza de la materia orgánica en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	67
16. Análisis de varianza de la respiración microbiana en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	68
17. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la respiración microbiana en los sistemas de uso del suelo	69
18. Número de individuos en los diferentes sistemas de uso del suelo en Supte San Jorge.....	71
19. Modelos de las variables.....	73
20. Cuadro analítico de los resultados.....	99
21. Hojas de evaluación.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Composición del suelo.....	5
2. Principales componentes de la calidad de suelo.....	8
3. Imagen con la ubicación de las zonas de muestreo.....	49
4. Diagrama de muestreo en cada sistema.....	50
5. Muestreo de la resistencia a la penetración.....	52
6. Resistencia a la penetración (k/cm^2), en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	62
7. Inestabilidad estructural (%), en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	64
8. Contenido de fósforo (ppm), en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	66
9. Contenido de materia orgánica (%), en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	67
10. Biomasa vegetal del suelo (t/ha), en los diferentes sistemas de uso.	68
11. Respiración microbiana en el suelo ($\text{mg CO}_2/100 \text{ g suelo}$), en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	69
12. Densidad de macroorganismos (individuos/m^2) en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	70
13. Índice de Shannon Wiener y el Índice de Equidad, en los diferentes sistemas de uso del suelo.....	72
14. Sistema de uso bosque.....	106
15. Sistema de uso con cacao.....	106
16. Sistema de uso con plátano.....	107

17.	Sistema de uso con maíz.....	107
18.	Sistema de uso con pasto.....	108
19.	Sistema de uso coca.....	108
20.	Suelo degradado.....	109
21.	Determinación de la resistencia a la penetración del suelo.....	109
22.	Evaluación de la fauna del suelo.....	110
23.	Determinación de la respiración microbiana.....	110
24.	Determinación de la inestabilidad estructural.....	111
25.	Determinación de la textura del suelo.....	111
26.	Determinación del fósforo del suelo.....	112
27.	Determinación de la materia orgánica.....	112

RESUMEN

La investigación se desarrolló en un fundo agrícola ubicado en la parte baja de la microcuenca del río Supte, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco; con el objetivo de evaluar si los diferentes sistemas de uso del suelo afectan la calidad del suelo en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Se ha extraído muestras de suelo de cada sistema y su análisis fué realizado en el Laboratorio de Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, otras muestras se determinaron *in situ*; usando para tal efecto, un diseño completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento. Se evaluaron siete sistemas de uso del suelo, siendo los sistemas de uso con bosque, cacao, plátano y pasto los que presentan una textura franco arcillosa, con maíz una textura franco y con coca junto al degradado una textura arcillosa. El sistema con mayor valor de resistencia a la penetración fue el del suelo degradado (4.50 kg/cm^2). Los valores más desfavorables de inestabilidad estructural se produjeron en el sistemas de suelos degradado (66.36%). El sistema de uso con maíz presentó un mayor contenido de fósforo en el suelo de 11.18 ppm. El sistema que presentó un nivel alto en materia orgánica fue el de uso con cacao (4.38 %). La respiración microbiana fue menor en el sistemas de uso con coca con $0.045 \text{ mg CO}_2/100 \text{ g suelo}$. El sistema que contiene mayor densidad de macro organismos es el de plátano con $2,416 \text{ individuos/m}^2$. En las condiciones estudiadas el indicador más sensible para evaluar la calidad del suelo, es la respiración microbiana.

I. INTRODUCCIÓN

En el periodo de 1943 a 1970, con la apertura de la carretera Federico Basadre, que permitió la conexión por vía terrestre de la zona de Pucallpa con las ciudades de Tingo María, Huánuco, Cerro de Pasco y Lima, se inicia un proceso socioeconómico muy dinámico de poblamiento y ocupación del espacio.

Los colonizadores empezaron con las prácticas de agricultura moderna que agotan los suelos rápidamente, realizando instalaciones inadecuadas de cultivos, reemplazando progresivamente la producción agrícola de policultivo por monocultivo y haciendo uso intensivo de pesticidas, causando así la disminución de su fertilidad y propiciando el avance de la deforestación de manera alarmante, debido a la falta de planificación al no tener un uso pertinente para las tierras de aptitud agrícola y tierras de protección, lo que ha provocado la degradación y como consecuencia, el deterioro de la calidad del suelo en la provincia de Leoncio Prado.

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo de acuerdo al uso y a las prácticas de manejo; para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo. La mantención o mejora de la calidad del suelo puede generar beneficios económicos en forma de aumentos en la productividad, mayor eficiencia en el uso de nutrientes, mejor

calidad del aire y del agua y reducción de los gases del efecto invernadero (ACEVEDO *et al.*, 2005).

La parte baja de la microcuenca del río Supte San Jorge, presenta diversos sistemas de uso del suelo, manejados distintamente por las labores que se realizan en cada uno de ellos, esto hace que altere la calidad del suelo difiriendo de un bosque como un sistema en equilibrio.

No se han registrado investigaciones en esta microcuenca sobre cómo sus sistemas de uso de los suelos pueden afectar su calidad y que las propiedades físicas, químicas y biológicas son variables importantes que permiten un correcto análisis e interpretación de la calidad de los suelos. En tal sentido en busca de una agricultura sustentable, estos indicadores del suelo proporcionan información valiosa para el entendimiento de la funcionalidad del suelo a corto plazo y la dirección del ecosistema si se encamina a su recuperación, preservación o degradación, así mismo como punto de partida en los planes, proyectos de manejo, y medidas de mitigación de la degradación de los sistemas de uso de suelos.

La investigación plantea la hipótesis: “los sistemas de uso del suelo en Supte San Jorge afectan la calidad del suelo”.

En tal sentido, los objetivos planteados fueron:

General

- Evaluar la calidad del suelo en diferentes sistemas de uso en Supte San Jorge.

Específicos

- Determinar las propiedades físicas y químicas como textura, resistencia a la penetración, inestabilidad estructural y contenido de fósforo en los sistemas de uso del suelo.

- Determinar las propiedades biológicas como la materia orgánica, la respiración microbiana y fauna en los sistemas de uso del suelo.

- Relacionar las propiedades físicas, químicas y biológicas como indicadores relevantes de calidad en los sistemas de uso del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El suelo

El sistema suelo, está constituido por tres fases; sólida, líquida y gaseosa, la fase sólida es dominante y consiste en partículas de diferentes tamaños rodeadas por agua y gases, cuyas cantidades y composición fluctúan en el espacio y en el tiempo. En términos de peso, los componentes del sistema suelo son divididos de la siguiente forma: materia inorgánica (45%), agua (20-30%), aire (20-30%) y materia orgánica (5%). Hay un intercambio continuo de moléculas e iones entre estas fases, mediados por procesos físicos, químicos y biológicos. El balance dinámico de estos procesos es fundamental para mantener la salud y calidad del suelo (BAUTISTA *et al.*, 2004).

ORTIZ *et al.* (2008) indican que desde el punto de vista edáfico, un suelo es un cuerpo natural tridimensional formado por la progresiva alteración física y química de un material original o roca madre a lo largo del tiempo, bajo unas condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos, mantiene un continuo intercambio de materia y energía. Esto lo convierte en una pieza clave del desarrollo de los ciclos biogeoquímicos y a desempeñar su papel como filtro de la contaminación

producida por compuestos orgánicos e inorgánicos, impidiendo que alcancen las aguas subterráneas y el aire o que entren en la cadena alimenticia.

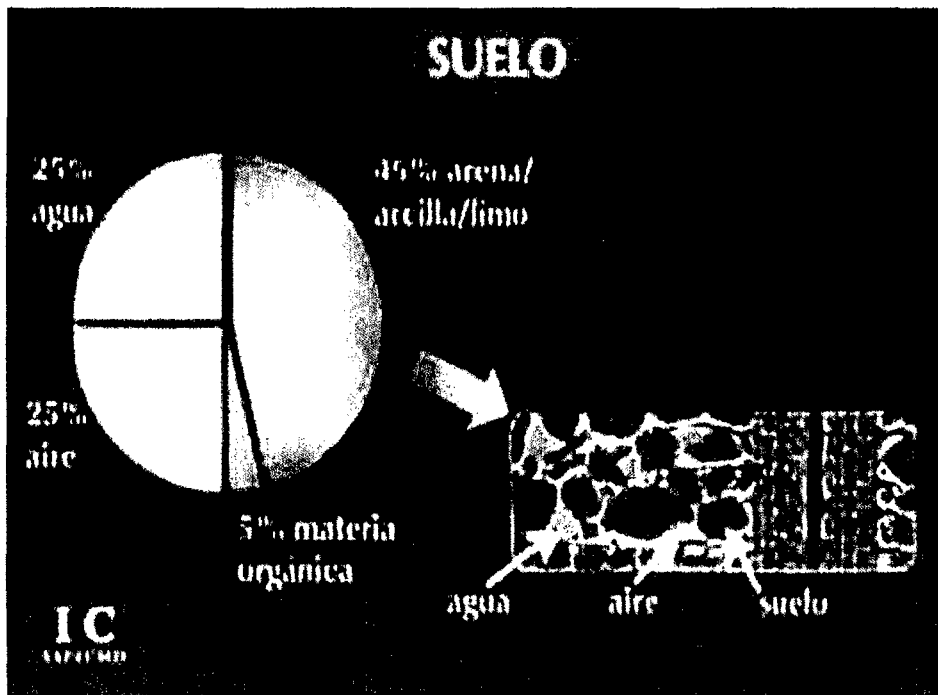


Figura 1. Composición del suelo (ONI, s. d.).

PNUMA (2000), citado por COTRINA (2011) manifiesta que como parte de los ecosistemas terrestres, los suelos cumplen importantes servicios ecosistémicos, el más conocido es el soporte y suministro de nutrientes a las plantas, de ahí que la degradación del suelo esté considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos. Este recurso es una unión en común con el ambiente y juega un rol fundamental en el uso sustentable y protección de todos los ecosistemas terrestres.

El suelo es la base de la vida en los ecosistemas terrestres y provee servicios ambientales esenciales como reciclaje de nutrientes, almacenamiento de carbono, conservación de la biodiversidad, regulación de la

calidad y cantidad de agua; a la vez se han propuesto cuatro funciones edáficas vitales según Karlen *et al.* (1997), citado por COTRINA (2011).

1. Sostener la actividad, diversidad y productividad biológica.
2. Regular y particionar el agua y flujo de solutos.
3. Filtrar, tamponar, drenar, inmovilizar y desintoxicar.
4. Almacenar y posibilitar el ciclo de nutrientes y otros elementos dentro de la biósfera de la tierra.

La alteración de las condiciones del suelo por el manejo puede afectar la producción de los cultivos debido a que influye en la distribución de la materia orgánica y dinámica de nutrientes; como así también sobre la agregación y porosidad del suelo (FERRERAS *et al.*, 2007), es sabido también por Cambardella y Elliott (1993), citado por ARUANI (2006) que el exceso de labranza conduce a la degradación del suelo, generando compactación, falta de oxígeno y desagregación de las partículas.

2.2. Calidad del suelo

La calidad del suelo ha declinado por el proceso de agriculturización creciente, en muchas situaciones desmedido, sumado al manejo inadecuado de las tierras, lo que ha conducido al deterioro de la estructura del suelo y a la consecuente reducción en el nivel de materia orgánica, con una marcada disminución de la fertilidad química y física del suelo. La alteración de las condiciones del suelo por las prácticas de manejo puede afectar la producción de los cultivos, por un lado, a través de su influencia en la distribución de la materia orgánica, actividad microbiana y

dinámica de nutrientes; y por otro lado, modificando propiedades físicas del suelo como agregación y porosidad (Martens y Frankenberger, 1992; Salinas *et al.*, 1997; Díaz *et al.*, 2002; citados por FERRERAS *et al.*, 2007).

La calidad del suelo se puede definir brevemente como la "adecuación para un uso". Esto significa que la calidad de un suelo dependerá no solamente de su naturaleza dinámica sino además del uso y manejo que se le dé. El mantenimiento y mejoramiento de la calidad del suelo en los sistemas de cultivo continuo es fundamental para sostener la productividad agrícola y la calidad del medio ambiente para las generaciones futuras (Larson y Pierce, 1994; Doran y Safley, 1997; citados por COTRINA, 2011).

Según BAUTISTA *et al.* (2004) la preocupación por la calidad del suelo no es nueva. El concepto de calidad del suelo ha estado asociado con el de sostenibilidad. En el caso de Budd (1992), es el número de individuos que se pueden mantener en un área dada; para Buol (1995), el uso del suelo se debe de basar en la capacidad de éste para proporcionar elementos esenciales, pues éstos son finitos y limitan, por ende, la productividad y para Karlen *et al.* (1997), la calidad del suelo, ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en la década anterior.

El término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo (Figura 2) según Doran y Parkin (1994), Karlen *et al.* (1997), citados por BAUTISTA *et al.* (2004):

1. Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible).

2. Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental).
3. Favorecer la salud de plantas, animales y humanos.

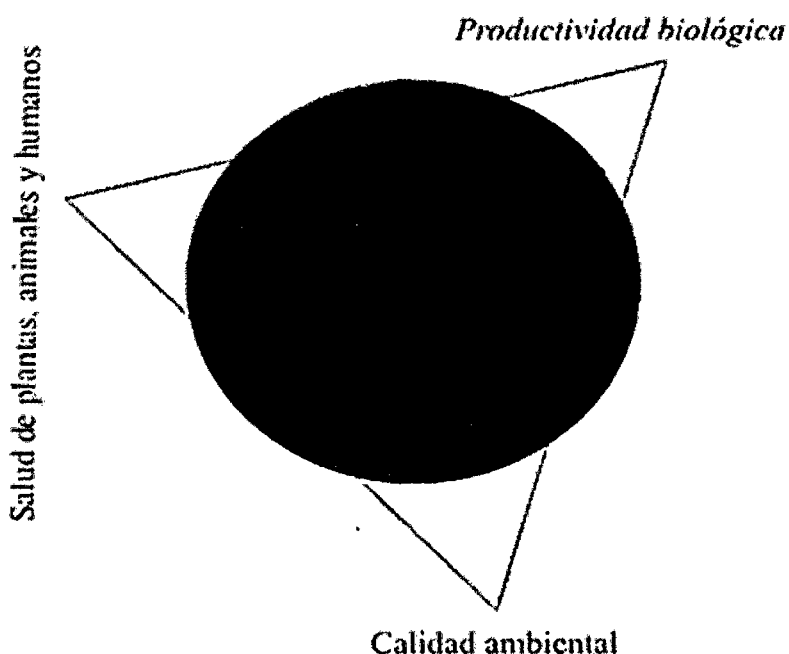


Figura 2. Principales componentes de la calidad de suelo (BAUTISTA *et al.*, 2004).

El Comité de la Sociedad de la Ciencia del Suelo Americana define la calidad del suelo como “la capacidad funcional de un tipo específico de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal”; incluye los conceptos de capacidad productiva del suelo y la protección ambiental. Las funciones específicas a que hace referencia el concepto de calidad del suelo según Brejeda y Moorman (2001), citados por ACEVEDO *et al.* (2005) son:

1. Captar, mantener y liberar nutrientes y otros compuestos químicos.
2. Captar, mantener y liberar agua a las plantas y recargar las napas subterráneas.

3. Mantener un hábitat edáfico adecuado para la actividad biológica del suelo.

Según Guzmán (2000), citados por ACEVEDO *et al.* (2005) la calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo de acuerdo al uso y a las prácticas de manejo; para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo. La manutención o mejora de la calidad del suelo puede generar beneficios económicos en forma de aumentos en la productividad, mayor eficiencia en el uso de nutrientes, mejor calidad del aire y del agua, y reducción de los gases del efecto invernadero.

Por otro lado, CARRASCO (2008) menciona que la aptitud que posee un suelo que se encuentra en un determinado esquema de manejo, con cierto clima y paisaje para sostener la productividad y calidad de las plantas y animales, y promover la salud humana, se denomina "Calidad y salud del suelo".

El adecuado manejo de los conceptos sobre calidad del suelo debe redundar en un mejor manejo de la sostenibilidad del recurso, de la agricultura sostenible y en la toma de decisiones de políticas de uso del suelo (BAUTISTA *et al.*, 2004).

2.3. Indicadores de calidad del suelo

El suelo, a diferencia del agua y el aire no tiene estándares de calidad definidos debido a su variabilidad, por lo que es casi imposible establecer una simple medida, se deben considerar factores que afectan su funcionamiento, lo que dificulta definir, medir y regular la calidad de este

recurso. La calidad del suelo se puede evaluar empleando indicadores que reflejen los cambios en la capacidad del suelo y en su función (Dalurzo *et al.*, 2002; citados por ACEVEDO *et al.*, 2005).

Los indicadores de calidad del suelo permiten analizar la situación actual e identificar puntos críticos con respecto a la sustentabilidad del suelo como medio productivo o bien como recurso natural importante para la calidad de la vida y mantención de la biodiversidad; permiten analizar los posibles impactos antes de una intervención; monitorear el impacto de la intervención y ayudar a determinar si el uso del recurso es sustentable. La evolución de la calidad del suelo puede determinarse de manera comparativa o relativa. Para esto se puede comparar la evolución de un sistema a través del tiempo que es una comparación longitudinal, u observar simultáneamente uno o más sistemas de manejo alternativo con una referencia que es una comparación transversal (Maserá *et al.*, 1999; citados por ACEVEDO *et al.*, 2005).

Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, pues representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Dumanski *et al.*, 1998; citados por BAUTISTA *et al.*, 2004).

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; citados por COTRINA, 2011).

Para Dumanski *et al.* (1998); citados por BAUTISTA *et al.* (2004) dichos indicadores no podrían ser un grupo seleccionado ad hoc para cada situación particular, sino que deben ser los mismos en todos los casos. Esto con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones a nivel nacional e internacional. Tal posición no es compartida con Astier *et al.* (2002), citados por BAUTISTA *et al.* (2004) quienes sostienen que los indicadores que se empleen deben reflejar las principales restricciones del suelo, en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúan. Hünнемeyer *et al.* (1997); citados por BAUTISTA *et al.* (2004) establecieron que los indicadores deberían permitir: (a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible; (b) analizar los posibles impactos antes de una intervención; (c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y (d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación del suelo. La identificación efectiva de indicadores apropiados para evaluar la calidad del suelo depende del objetivo, que debe considerar los múltiples componentes de la función del suelo, en particular, el productivo y el ambiental (BAUTISTA *et al.*, 2004).

Existen muchas propuestas de indicadores de calidad del suelo, por lo que no habría un enfoque único para generar un conjunto de indicadores para cada propósito. Los enfoques pueden cambiar con el tiempo conforme incrementa el entendimiento de los problemas ambientales y conforme los valores sociales evolucionan (BAUTISTA *et al.*, 2004).

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; citados por COTRINA, 2011).

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, 1994; citados por COTRINA, 2011).

2.3.1. Indicadores físicos

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar fácilmente. Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores

de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros (BAUTISTA *et al.*, 2004).

Jaramillo (2002); citados por PAZ (2007) menciona que las propiedades físicas o mecánicas del suelo son determinadas por la proporción de los componentes del suelo, materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire), entre ellas; textura, estructura, consistencia, densidad, porosidad, permeabilidad, temperatura y color. Su importancia radica en que determinan el movimiento del agua y los gases, la dinámica microbiana, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radical.

BAUTISTA *et al.* (2004) afirman que algunos indicadores físicos son: la densidad aparente, resistencia a la penetración, inestabilidad estructural, entre otros. Doran y Parkin (1994) seleccionaron como indicadores la textura, profundidad, tasa de infiltración de agua del suelo, densidad aparente y capacidad de retención de agua. CHEN (2000) por otra parte sugirió la textura del suelo, que se relaciona con la porosidad, infiltración y disponibilidad de agua; la densidad aparente, relacionada con la tasa de infiltración y conductividad hidráulica; y la estabilidad de agregados que se relaciona con la resistencia a la erosión y contenido de materia orgánica. Para la Universidad de Chile las propiedades físicas más útiles como indicadores de

calidad del suelo, son la densidad aparente y estabilidad de agregados, que reflejan la manera en que el suelo acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que presenta a la emergencia de las plántulas y el crecimiento de las raíces (ACEVEDO *et al.*, 2005).

2.3.1.1. Textura del suelo

Se considera que un suelo presenta buena textura cuando, la proporción de los elementos que lo constituyen, le brindan a la planta la posibilidad de ser un soporte que permita un buen desarrollo radicular y brinde un adecuado nivel de nutrientes.

La textura del suelo depende de la naturaleza de la roca madre y de los procesos de evolución del suelo, siendo el resultado de la acción e intensidad de los factores de formación de suelo (CROSARA, s. d.).

El suelo está constituido por partículas de muy diferentes tamaños, el término textura se usa para representar la composición granulométrica del suelo. Cada término textural corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. En los términos de textura se prescinde de los contenidos en gravas; se refieren a la fracción del suelo que se estudia en el laboratorio de análisis de suelos y que se conoce como tierra fina.

Los términos texturales se definen de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones (EDAFOLOGÍA, 2012).

Suelos Franco, son aquellos que tienen una textura media (45% de arena, 40% de limo y 15% de arcilla aprox.). Estos suelos presentan las mejores condiciones tanto físicas como químicas, siendo los más aptos para el cultivo (ESCARLATA, 2011).

La clase Franco Arcillosa, es moderadamente fina, cuando la arcilla es abundante, está entre arcilloso y franco tiene bastante arcilla pero también lleva mucho limo y poca arena (DUQUE y ESCOBAR, 2002).

Cuadro 1. Propiedades de los diferentes tipos de suelos.

Propiedad	Suelo Arenoso	Suelo Arcilloso	Suelo Franco
Permeabilidad	Alta	Nula	Media
Capacidad de retención de agua	Poco	Mucho	Medio
Aireación	Buena	Mala	Buena
Nutrientes	Pocos	Muchos	Medio-Alto
Tamaño de partículas	Medias	Muy finas	Finas

Fuente: ESCARLATA, 2011.

Suelos arcillosos, se denominan suelos pesados o fuertes, este tipo de suelos presentan una textura fina, con un alto predominio de arcillas, lo que le permite una elevada retención de agua y nutrientes. No obstante posee una baja porosidad y por lo tanto, la consecuencia lógica es que son suelos que carecen de buenas posibilidades de aireación. Por este motivo se dice que son terrenos difíciles de trabajar ya que poseen una elevada viscosidad que ofrece una gran resistencia a la penetración de raíces. Un aspecto peor aún que las

dificultades de penetración de las raíces, es el hecho de que este tipo de suelo impide una correcta aireación de las mismas, y por tanto, tarde o temprano terminan pudriéndose (ESCARLATA, 2011).

El cacao requiere de suelos en los cuales las raíces puedan penetrar fácilmente, que retengan humedad durante la época seca y que permitan la circulación de aire y humedad. El cacao es capaz de adaptarse a los más variados tipos de suelo, incluso en aquellos cuyo contenido de nutrientes es muy bajo, pero la producción suele ser muy limitada a un rendimiento medio, si el cultivo se mantiene bajo un adecuado sombraje y si los demás factores ecológicos son favorables.

Con relación a las propiedades físicas y químicas, el cultivo de cacao requiere de suelos profundos, con buen contenido de materia orgánica, nutrientes minerales y que no contengan piedras y gravas, que impidan el buen desarrollo radicular. En suelos de textura arcillosa, la penetración de las raíces se ve limitada en función de los minerales que constituyan esta fracción. La fracción arcillosa de la mayoría de los suelos en los trópicos húmedos se compone de arcillas caoliníticas y de óxidos de hierro y de aluminio, las cuales proporcionan un medio físico ideal para el desarrollo de las raíces del cacao. Las mejores condiciones las presentan los terrenos franco-arcillosos (GÓMEZ y AZÓCAR, 2002).

El cultivo de plátano, requiere de suelos profundos, bien drenados, que retengan humedad, los mejores suelos son los de textura franca arcillosa a

franco arenoso, arcillas livianas friable y drenada. Debe evitarse los suelos con cascajo o arcilla impermeable (ICTA.GOB, s. d.)

El maíz es muy exigente en suelos profundos, ricos en materia orgánica de buena fertilidad, sin compactación o pie de arado, baja presencia de piedras, nivelados y sin sectores que se aneguen con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular (GALEON, s. d.).

2.3.1.2. Resistencia del suelo a la penetración

Varios autores han determinado que la resistencia a la penetración es un parámetro más sensible que la densidad aparente para detectar los efectos de las prácticas de manejo sobre el suelo (Bauder y Black, 1981; Hammel, 1989; citados por FERRERAS *et al.*, 2007). El incremento en la resistencia mecánica del suelo bajo sistemas conservacionistas reduce el crecimiento de las raíces, con efectos negativos sobre el abastecimiento de agua y nutrientes por parte de los cultivos (Kirkegaard *et al.*, 1994; citados por FERRERAS *et al.*, 2007).

La resistencia a la penetración es un buen índice para evaluar problemas de restricción en el desarrollo radicular de las raíces de los cultivos, por la presencia de capas compactas y/o baja porosidad. La penetrabilidad del suelo permite conocer la facilidad con que un objeto puede ser introducido en el, es decir, la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la expansión lateral y al corte que produce dicho objeto. Esa resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y

propiedades, tales como densidad aparente, contenido de humedad, resistencia a la penetración y al corte, las cuales a su vez, son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo. Su evaluación puede realizarse a través de determinaciones bastante sencillas que fácilmente pudieran realizarse en forma rutinaria (NACCI y PLA SENTIS, 1992).

Abercombie (1990); citados por ARUANI y BEHMER (2004) estudió el desarrollo radical en árboles de palta (*Persea americana Mill.*) y encontró un menor crecimiento de raíces en suelos con mayores valores de resistencia a la penetración, así mismo Wolkowski (1990); citados por ARUANI y BEHMER (2004) afirma que el suelo compactado tiene una reducida capacidad para el movimiento del aire y del agua, y ofrece una gran resistencia a la penetración de las raíces, incrementando la tasa de difusión de los nutrientes por el acercamiento entre las partículas.

La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración y la densidad aparente y reduciendo la porosidad. El aumento de la resistencia mecánica del suelo va a restringir el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, tales como los que se ubican entre las estructuras (terrones), en cavidades formadas por la fauna del suelo (lombrices) y en espacios que se producen por la descomposición de restos orgánicos gruesos (raíces muertas). Esta situación va a producir un patrón de crecimiento característico de raíces aplanadas,

ubicadas en fisuras del suelo, con una escasa exploración del volumen total del suelo (RAMÍREZ y SALAZAR, 2006).

Los resultados de estos autores muestran que el suelo después de pasar mínimamente por 5 años de labranza, requiere de más de cinco años para recuperar un poco la estructura perdida, pero es importante señalar que es muy difícil que el suelo forme una estructura similar a como era antes de que fuese intervenido. El valor más alto de resistencia a la penetración lo obtuvo el correspondiente al suelo con 20 años de labranza, lo cual indica que la labranza afecta a las propiedades físicas del suelo, haciendo que la resistencia a la penetración sea mayor y actúe con la densidad aparente como un indicador de compactación cuando se presenta mayor labranza; así mismo los estudios realizados por JIMÉNEZ *et al.* (1992) coinciden con los realizados en el estudio de RAMÍREZ Y SALAZAR (2006) donde a mayor labranza se da mayor pérdida de características físicas del suelo.

Para Forsythe (1985), citados por HERNÁNDEZ *et al.* (2011) el valor crítico para esta variable ha sido de $2,96 \text{ k/cm}^2$ para el crecimiento de las raíces y $2,75 \text{ k/cm}^2$ como un valor crítico de resistencia a la penetración para el rendimiento en el cultivo de maíz.

La tendencia de mayores valores de resistencia a la penetración en las capas superficiales del suelo, han sido encontrados por otros investigadores principalmente en sistemas de pastoreo. STANKOVICOVA *et al.* (2008) evaluaron la resistencia a la penetración en pasturas bajo 3 diferentes sistemas

y encontraron valores altos con una tendencia a la disminución de la variable al aumentar la profundidad (HENRÍQUEZ *et al.*, 2011).

FERRERAS *et al.* (2007) encontró que las mediciones de resistencia a la penetración en el suelo quasi-prístino fueron inferiores y con diferencias estadísticamente significativas con respecto a los suelos cultivados en los diferentes sitios.

Se ha reportado en trabajos como los de Veihmeyer y Hendrickson (1948) y Bengough y Mullins (1991); citados por HERNRÍQUEZ *et al.* (2011) que la relación directa que existe entre la penetración de raíces con la densidad del suelo y la resistencia a la penetración. La compactación se refleja también en un aumento de la resistencia mecánica o dureza del suelo, la cual es posible medirla con un penetrómetro.

Según Forstythe (1985); citados por HERNRÍQUEZ *et al.* (2011) estudios previos han demostrado que el penetrómetro de pistón tipo "Chatillón" ha sido muy apropiado para representar la variaciones en la resistencia a la penetración de los suelos y ha sido igualmente el más utilizado en estudios en Costa Rica.

Un instrumento usado es el pocketpenetrometer Assembly S-170 (ICT, 2004) cuya unidad de medida es el k/cm^2 para la resistencia a la penetración, que con un rango de $0 - 4.5 \text{ k/cm}^2$, presentando los siguientes niveles de interpretación:

Cuadro 2. Niveles de resistencia de suelo a la penetración.

(k/cm ²)	Nivel de resistencia
< 1	Suelos muy suaves
1 - 2	Suelos suaves
2 - 3	Suelos duros
3 - 4	Suelos muy duros
> 4	Suelos extremadamente duros

Fuente: ICT (2004).

2.3.1.3. Estabilidad estructural

La estructura del suelo según Montenegro (1991); citados por CALDERÓN (s. d) tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, siendo, en determinados casos, un factor limitante en la producción. Una estructura desfavorable puede acarrear problemas en el desarrollo de las plantas, tales como el exceso o deficiencia de agua, la falta de aire, la incidencia de enfermedades, la baja actividad microbiana, el impedimento para el desarrollo de las raíces, etc; por el contrario, una estructura favorable permitirá que los factores de crecimiento actúen eficientemente y se obtengan, en consecuencia, los mayores rendimientos de las cosechas.

La estabilidad estructural de los suelos depende de varios factores y su evaluación se hace con diversos métodos e índices de predicción. Uno de los indicadores es la materia orgánica del suelo, ya que ayuda a mantener las

partículas minerales unidas frente a las fuerzas desestabilizadoras como el humedecimiento e impacto de gotas de lluvia (PULIDO *et al.*, 2009).

Una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces es a través de la estabilidad de la estructura, debido a que este parámetro gobierna tanto los aspectos relacionados con la compactación, como los vinculados con el almacenaje y movimiento de agua y aire (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004; citados por FERRERAS *et al.*, 2007).

Mediante la técnica de estabilidad estructural se pueden evaluar varios aspectos relacionados al suelo, ya que a través de la misma se tiene en cuenta la porosidad (macro y microporosidad), el carbono orgánico y la actividad biológica, desde el punto de vista de la generación de poros y de la humificación de la materia orgánica (Reynolds *et al.*, 2002; citados por FERRERAS *et al.*, 2007).

Los indicadores de fertilidad física más sensibles o los que aportan mayor información relevante son el porcentaje de agregados estables a los pretratamientos a agua y etanol, concluyendo que suelos con inestabilidad estructural de agregados fueron suelos compactados (FERRERAS *et al.*, 2007).

FERRERAS *et al.* (2007) concluyeron que los suelos que evidenciaron pérdida de estabilidad estructural aumentaron la susceptibilidad a la compactación de suelos, y aquellos suelos que presentaron mejor característica de estructuración y menor resistencia a la penetración, pueden

presentar un mejor comportamiento frente a factores que inciden en la degradación. Y suelos con inestabilidad estructural de agregados fueron suelos compactados.

En estudios realizados sobre Argiudoles Vérticos por Gómez *et al.*, (2001), citados por FERRERAS *et al.* (2007) hallaron mayor estabilidad de los agregados en los sitios no perturbados en comparación con el mismo tipo de suelo alterado por la actividad agrícola. El incremento en la estabilidad estructural en situaciones vírgenes, es atribuido a la intensificación de las fuerzas de cohesión entre partículas minerales y orgánicas como consecuencia de un mayor porcentaje de la fracción orgánica humificada.

Por otro lado Cambardella y Elliot (1993), citados por ARUANI *et al.* (2006) encontraron el mayor grado de estabilidad en suelos francos no labrados y más aún en los suelos con cobertura nativa. El activo sistema radicular de la festuca realiza presión sobre las partículas del suelo, favoreciendo su unión y la acción cementante de las sustancias orgánicas (polisacáridos y poliurónicos) derivados de la síntesis microbiana, en la zona de la rizósfera, ejercen mayor estabilidad sobre los agregados.

Kay (1990); citados por FERRERAS *et al.* (2007) introduce el término vulnerabilidad estructural para caracterizar la incapacidad de los suelos de hacer frente a situaciones de estrés. Un suelo puede ser vulnerable debido a una baja estabilidad estructural, es decir que no posee capacidad para resistir una degradación estructural inmediata cuando se aplica una fuerza disruptiva como, por ejemplo, el laboreo. No obstante, la vulnerabilidad puede deberse a

una baja resiliencia, es decir cierta incapacidad de recuperar su estructura original.

2.3.2. Indicadores químicos

Los indicadores químicos se refieren a condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo - planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y microorganismos. Algunos indicadores son la materia orgánica, capacidad de adsorción de fosfatos, disponibilidad de nutrimentos, entre otros (SQI, 1996; citados por BAUTISTA *et al.*, 2004).

2.3.2.1. Materia orgánica

La materia orgánica (MO) es un parámetro relacionado directamente con la calidad edáfica. El contenido en materia orgánica interviene en la estructura del horizonte, ayuda a formar los complejos arcillo-húmicos del suelo, mejora la capacidad de infiltración del agua en suelos arcillosos y aumenta la capacidad de retención en los suelos arenosos y determina la disponibilidad de nutrientes, influyendo por tanto positivamente en la productividad del suelo (GASTEIZ, s. d.).

La MO es un indicador de la calidad del suelo más usado, ya que incide directamente sobre propiedades edáficas, como estructura y disponibilidad de carbono y nitrógeno (Gregorich *et al.*, 1984; citados por SILVA, s. d). Numerosos estudios coinciden en que la MO, es el principal

indicador e indudablemente el que posee una influencia significativa sobre la calidad del suelo y su productividad (SILVA, s. d).

La MO tiene un efecto positivo sobre la formación y estabilidad de agregados del suelo y la retención de nutrientes (HERNÁNDEZ *et al.*, 2008). Su principal constituyente son las sustancias húmicas, que junto con los polisacáridos y la biomasa microbiana, son los ingredientes activos para la agregación del suelo (Yamaguchi *et al.*, 2004; citados por HERNÁNDEZ *et al.*, 2008).

En general, la MO del suelo promueve la estabilidad de los agregados porque reduce el hinchamiento del agregado, disminuye la permeabilidad del agregado, reduce las fuerzas destructivas del fenómeno de estallido y aumenta la fuerza intrínseca de los agregados (PULIDO *et al.*, 2009).

El contenido de MO del suelo no siempre tiene correlación con la estabilidad de los agregados, es decir que la cantidad de MO no es directamente responsable del número y estabilidad de los agregados; por tanto, la estabilidad puede depender más del tipo de MO y su disposición con respecto a las partículas minerales (Fortun y Fortun, 1989; Holeplass *et al.*, 2004; citados por PULIDO *et al.*, 2009).

En el trópico la conservación de la MO se puede considerar como un factor crítico para sistemas sostenibles de uso de la tierra. La MO tiene un efecto positivo sobre la formación y estabilidad de agregados del suelo y la retención de nutrientes (Hernández y López, 2002; citados por ZERBINO,

2005). Su principal constituyente son las sustancias húmicas, que junto con los polisacáridos y la biomasa microbiana, son los ingredientes activos para la agregación del suelo (Yamaguchi *et al.*, 2004; citados por ZERBINO, 2005).

Según su contenido en MO, los suelos pueden clasificarse de la siguiente manera:

Cuadro 3. Nivel de materia orgánica en el suelo

Nivel	Contenido (%)
Bajo o pobre	menos de 2
Medio	2-4
Alto o rico	mayor de 4

Fuente: GASTEIZ (s.d.)

Las hojas caídas juegan un papel importante al proveer cobertura al suelo modificando el ambiente edáfico, conforme se descompone, esta hojarasca se convierte en fuente importante de materia orgánica y activando el ciclo biogeoquímico (Altieri, 1999 y Gliessman, 2002; citados por MONTENEGRO, 2005).

La calidad química del suelo en los primeros 10 cm de profundidad es mejor en el ecosistema del bosque debido a una mayor entrada orgánica sobre y debajo la superficie del suelo, al haber una mayor diversidad de especies de plantas, cuya cantidad y calidad de hojarasca y raíces contribuyen fuertemente a los ciclos biogeoquímicos (Tremont y Cuevas, 2006; citados por ZERBINO, 2005).

La implementación de la siembra directa, es decir la no labranza del suelo, puede mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos puesto que contribuyen, en general, a mantener o incrementar el nivel de carbono orgánico del suelo (Franzluebbers *et al.*, 1999; Dexter, 2004; citados por FERRERAS *et al.*, 2007).

RAMÍREZ y SALAZAR (2006) observaron que a medida que aumenta el contenido de materia orgánica, disminuye la resistencia a la penetración, esto se puede deber a que la materia orgánica ayuda a que se aumente la porosidad del suelo.

SILVA (s. d.) en la evaluación de la calidad del suelo en distintos ambientes del sur de Santa Fé, concluyó que el grado de deterioro del suelo medido como pérdida de MO ha sido más intensa en los suelos de textura más fina.

2.3.2.2. Fósforo

El fósforo es un elemento esencial para la vida (IPNI, s.d.) y fundamental para la nutrición de las plantas (SANZANO, s. d.) y es el segundo elemento de importancia para las funciones nutricionales de las plantas (MARQUÉZ, s. d.), ya que lo necesitan para crecer y desarrollar su potencial genético (IPNI, s. d.); está presente en diversos compuestos que forman parte de los procesos de transferencia de energía: fotosíntesis, conversión de carbohidratos, la glucólisis, grasas y aminoácidos entre otros (MARQUEZ, s.d.).

Aunque el fósforo generalmente se incluye dentro del grupo de elementos mayores porque se aplica en grandes cantidades, no es en realidad consumido por la planta en gran magnitud, sino que su uso en el suelo resulta muy ineficiente (RAMOS; 2003) y lamentablemente, no es abundante en el suelo. Y lo que es peor, mucho del fósforo presente en el suelo no está en formas disponibles para la planta (IPNI, s. d.).

SANZANO (s. d.) menciona que aunque las plantas contienen fósforo en menor cantidad a comparación del nitrógeno, potasio, y calcio, lo tiene como factor limitativo de más importancia. Es un elemento que da calidad y precocidad a las plantas, ya que adelanta la maduración, a diferencia del nitrógeno, que tiende a prolongar el crecimiento vegetativo. Cumple un rol plástico, porque se encuentra en toda la planta, y especialmente en los tejidos jóvenes y órganos de reserva. En los primeros interviene en la síntesis proteica y contribuye al desarrollo radicular. En los órganos de reserva (semillas y tubérculos) forma parte de fosfolípidos y ácidos nucleicos. También cumple un rol metabólico, ya que desempeña un papel indispensable como acumulador de energía y combustible para todas las actividades bioquímicas de las células vivientes al formar parte del adenosíntrifosfato (ATP).

El fósforo es absorbido en forma de fosfatos mono y diácidos. A diferencia del nitrógeno y del azufre, que son otros elementos que se absorben en forma aniónica, el fósforo es un elemento poco móvil. Por su tendencia a reaccionar dando formas fosforadas no disponibles para las plantas es que debe ser considerado uno de los elementos más críticos (SANZANO, s. d.).

El fósforo soluble, son las formas aprovechables para las plantas en forma inmediata, es decir son fosfatos en la solución del suelo. Su concentración es muy débil y fluctúa entre 0,2 y 0,5 mg/l, o sea 200 a 400 g/ha en 30 centímetros de espesor. En suelos muy ricos la concentración puede llegar hasta 1 mg/l (1 ppm) y en suelos pobres a 0,1 mg/l. Generalmente es una concentración constante y permanece así aunque varíe la relación suelo-agua (SANZANO, s. d.).

Las formas solubles de fósforo en el suelo son los fosfatos diácidos (H_2PO_4^-) y monoácidos (HPO_4^{2-}). La concentración de los iones fosfatos en solución está relacionada con el pH de la misma. El ion H_2PO_4^- es favorecido por los pH bajos, mientras que el ion HPO_4^{2-} por los pH más altos (SANZANO, s.d.).

Al aumentar el contenido de materia orgánica de los suelos, aumenta el contenido de fosfato orgánico y por lo tanto los contenidos totales llegan a ser mayores. Factores estabilizadores de materia orgánica como órgano minerales y alófana es muy posible que conduzcan a elevar los niveles de fósforo total de los suelos. El contenido total también depende de la textura del suelo y tanto en áreas de clima templado como tropicales, entre más fina sea la textura, mayor es el contenido de fósforo total (RAMOS, 2003). Por otro lado, NAVARRO (1984) con los datos obtenidos en su estudio, afirma que el origen del fósforo en el suelo se debe principalmente al material parental o madre, ya que la cantidad de fósforo no depende de la cantidad de materia

orgánica presente en el suelo, es decir, no necesariamente a mayor cantidad de materia orgánica se tendrá mayor cantidad de fósforo en el suelo.

La erosión y la remoción por el cultivo son las dos únicas formas significativas de pérdida de fósforo del suelo (RAMOS, 2003).

Factores que afectan la disponibilidad de fósforo para las plantas son la humedad, textura, coloide inorgánico, materia orgánica, material original (SANZANO, s. d.), el pH del suelo que influye en la disponibilidad del fósforo inorgánico, disminuyendo en suelos ácidos (MARQUEZ, s. d.) y siendo más disponibles a pH entre 6 y 7.5 (ROMERO, 1996).

En el suelo generalmente, el fósforo se encuentra en forma orgánica e inorgánica o combinado con elementos como: hierro, aluminio, flúor y calcio entre otros, tendiendo a formar compuestos pocos o insolubles en el agua (MARQUÉZ, s. d.).

La disponibilidad de este elemento depende del tipo de suelo, según este, una pequeña o gran parte del fósforo total puede estar "fijado" (no disponible) en los minerales del suelo. Esto significa que la planta no puede absorberlo. En la naturaleza, el fósforo forma parte de las rocas y los minerales del suelo. Las fuentes de fósforo como nutrimento para las plantas son los fertilizantes minerales y los fertilizantes orgánicos. Los fertilizantes minerales son compuestos inorgánicos de fósforo que se extraen de los grandes yacimientos de "roca fosfórica". Estos compuestos minerales, son tratados para hacerlos más solubles para que así, sean disponibles para las plantas y

puedan ser utilizados por estas en la formación de tejidos y órganos vegetales (IPNI, s. d.).

El ciclo del fósforo en la naturaleza y la intervención del hombre en el mismo. Se puede observar que se pierde fósforo por escurrimiento, erosión, lavado y extracción en la cosecha. Por otro lado se regresa fósforo al suelo por medio de adición de fertilizantes minerales (que es la más importante y significativa), retorno de residuos de animales y plantas y por deposición atmosférica (IPNI, s. d.).

Cuadro 4. Niveles críticos de fósforo en el suelo

Nivel	Fósforo (ppm)
Bajo	Menos de 7
Medio	7 –14
Alto	Más de 14

Fuente: CANO (s.d.).

2.3.3. Indicadores biológicos

Las propiedades biológicas del suelo son muy dinámicas por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos. DORAN Y PARKIN (1994) seleccionaron como indicadores biológicos el carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, el nitrógeno potencialmente minerizable y la respiración edáfica, que también se consideran como indicadores biológicos (ACEVEDO *et al.*, 2005).

La respiración edáfica, biomasa microbiana, microorganismos y otros son más sensibles y son más valiosas en la interpretación de la dinámica de la materia orgánica y en el proceso de transformación de los residuos orgánicos; además, dan rápida respuesta a los cambios en el manejo del suelo, son sensibles al estrés ambiental y fáciles de medir (Bandick y Dick, 1999; citados por ACEVEDO *et al.*, 2005).

Los microorganismos son la fuente principal de enzimas, y a pesar de sus relativamente bajas cantidades, juegan un rol fundamental en el mantenimiento y dinámica de los nutrientes a través del ciclado de la materia orgánica (Bolinder *et al.*, 1999; citados por FERRERAS *et al.*, 2009).

La composición y la cantidad de materia orgánica edáfica juegan un rol fundamental en el funcionamiento y sustentabilidad de los sistemas agropecuarios, debido a que impactan significativamente sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Rotenberg *et al.*, 2007; citados por FERRERAS *et al.*, 2009). Este parámetro usualmente es utilizado como indicador de calidad de suelo, pero para detectar cambios como resultado de los disturbios generalmente se requieren muchos años (5-10 años). No obstante, la mineralización de la materia orgánica del suelo es controlada principalmente por el tamaño y la actividad de la biomasa microbiana que puede responder a los disturbios en una escala de tiempo menor. Los parámetros biológicos y bioquímicos tienden a reaccionar de manera más rápida y sensible a los cambios producidos por el manejo, por lo tanto podrían constituir una señal temprana y sensible y ser de utilidad para estimar la

calidad edáfica, incluso antes que las propiedades físicas y químicas (Nannipieri, 1994; citados por FERRERAS *et al.*, 2009).

2.3.3.1. Respiración microbiana

El manejo intensivo del suelo altera considerablemente las propiedades y condiciones ambientales de dicho suelo lo que puede repercutir en la actividad de los microorganismos y por consiguiente en la descomposición de la materia orgánica y en la dinámica de CO₂ (GARCÍA *et al.*, 2003).

La fracción biótica de la materia orgánica, formada por microorganismos vivos, desempeña un papel básico en los suelos para mantenerla fertilidad del suelo y en la nutrición de las plantas (ÁLVAREZ y ANZUETO, 2004); y por ser la última responsable del estado de la materia orgánica, del desarrollo, funcionalidad del ecosistema (Smith *et al.*, 1993; citados por GARCÍA *et al.*, 2003), en el proceso de descomposición de la materia orgánica dan origen a productos metabólicos como mucilagos, gomas, ácidos, enzimas y polisacáridos extracelulares, y por supuesto CO₂ (MORA, s. d.). Los microorganismos, por consiguiente, influyen sobre los ecosistemas y su fertilidad, interviniendo tanto en el establecimiento de los ciclos biogeoquímicos como en la formación de la estructura de los suelos. Se puede, pues, afirmar que el estudio de la calidad biológica y bioquímica de un suelo puede servir como indicador del estado general de dicho suelo. Este tipo de medidas no resulta sencillo debido a lo complicado que es el estudio de los microorganismos y de sus reacciones al nivel de microhábitats, pero está claro

que son necesario parámetros de actividad microbiana que ayuden a conseguir este conocimiento, y la respiración de los microorganismos del suelo es, sin duda, uno de ellos (GARCÍA *et al.*, 2003).

La estimación de la respiración del suelo da una idea de la dinámica de su biota y, por lo tanto, de los procesos metabólicos que en él se desarrollan; tales procesos varían en función de factores biofísicos y climáticos del suelo y del uso de la tierra, por lo cual su medición es un indicador de la actividad microbiana presente, pues una buena actividad microbiana puede ser el reflejo de óptimas condiciones físicas y químicas que permitan el desarrollo de los procesos metabólicos de bacterias, hongos, algas y actinomicetos y de su acción sobre los substratos orgánicos (MORA, s. d.). Para un mejor aprovechamiento de las interacciones biológicas en el suelo es importante conocer la respuesta de las poblaciones microbianas a los cambios en el uso de la tierra y los factores edáficos que influyen en su actividad (ÁLVAREZ y ANZUETO, 2004).

Para Anderson (1982), citado por GARCÍA *et al.* (2003) la respiración microbiana es definida por como el consumo de O_2 o desprendimiento de CO_2 por bacterias, hongos, algas, protozoos, incluyendo el intercambio de gases por el metabolismo de organismos tanto aeróbicos como anaeróbicos. En definitiva, podemos resumir que el término respiración del suelo hace referencia a la actividad biológica global de la biota del suelo, incluyendo a los microorganismos (bacterias, algas, hongos y protozoos), macroorganismos (lombrices de tierra, nemátodos e insectos) y raíces de las

plantas, mientras que la respiración microbiana refleja exclusivamente la actividad metabólica de los microorganismos; es por ello que el desprendimiento de CO₂ es uno de los parámetros más frecuentes, más antiguos y más sensibles para cuantificar las actividades microbianas, debido a que ésta responde en forma diferente a los cambios ambientales (ACOSTA *et al.*, 2006) y cambios que ocurren en la transformación de la materia orgánica, detectándose en el proceso una fase inicial de mineralización rápida, donde tiene lugar la descomposición por los microorganismos de los compuestos fácilmente disponibles y otra fase inicial donde la mineralización es lenta; indicando el agotamiento de nutrientes para la microbiota involucrada en la descomposición (ACOSTA *et al.*, 2006).

La estimación de la actividad microbiana puede constituir un importante indicador de la calidad del suelo, pues ésta se incrementa a medida que crecen las poblaciones de hongos, bacterias y actinomicetos, actuando sobre los substratos orgánicos; es decir, que a la vez es un indicador de la magnitud de las poblaciones y de la calidad de los materiales orgánicos que han ingresado al suelo, en un substrato con altos contenidos de polifenoles, lignina y celulosa, el desprendimiento de CO₂ será menor que cuando los materiales expuestos a la descomposición microbiana son ricos en proteínas y azúcares; por otra parte, el desprendimiento de CO₂ es un indicador de los procesos de mineralización que se están desarrollando en el suelo y, por lo tanto, de la liberación de nutrimentos para las plantas. Un incremento en la actividad microbiana puede estar correlacionado también con la generación de productos metabólicos como polisacáridos extracelulares, enzimas y ácidos

poliurónicos, muy importantes en la estabilización de los agregados del suelo (MORA, s. d.).

Según GARCÍA *et al.* (2003) la respiración del suelo se ve afectada por factores tales como la humedad, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la estructura del suelo y las prácticas agrícolas.

Prina *et al.* (2001); citados por HERNÁNDEZ *et al.* (2008) señalan que la biomasa microbiana, su actividad y estructura comunitaria, son influenciadas por diferentes especies arbóreas, debido a que la composición química de la hojarasca y de las raíces influye en la descomposición de las entradas orgánicas y mineralización de nutrientes. A su vez, los ecosistemas con una mayor biodiversidad generan una mayor diversidad catabólica de la comunidad microbiana del suelo.

Según estudios realizados por HERNÁNDEZ *et al.* (2008) en cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*), la producción microbiana de CO₂ disminuyó significativamente cuando el pino se introdujo como monocultivo, pero cuando el eucalipto fue usado en la reforestación, el suelo no mostró cambios en la actividad microbiana (CO₂) con relación al suelo de Bosque Húmedo.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1993); citados por MORA (s. d.) llegó a la conclusión de que los suelos bajo bosque presentan la tasa más alta de producción de CO₂, seguidamente los suelos bajo pasto Braquiaria, evidenciando que el cultivo hace más favorable las condiciones

para la proliferación bacteriana, así como la edad de la planta que también altera la flora edáfica, pues parece que los microorganismos responden más a las secreciones de la raíz que a los tejidos en descomposición; por otra parte, la forma de enraizamiento de las plantas modifica algunas propiedades del suelo. En este sentido es notorio el papel de los pastos Braquiaria, especialmente en la modificación de la estructura, favoreciendo el crecimiento de los microorganismos así como sus funciones.

ÁLVAREZ y ANZUETO (2004) realizaron un estudio que evaluó la actividad microbiana en diferentes sistemas de producción de maíz, encontraron que la respiración microbiana se incrementó más en los suelos con uso agrícola reciente, que en los terrenos con más años de cultivo.

RAMIREZ *et al.* (s. d.) reportaron que en el suelo virgen se evidencia la mayor respiración con 0.264 mg CO₂/100 g y la menor en el suelo con más de 20 años de labranza con una producción promedio de CO₂ de 0.0087 mg CO₂/100 g. Por tanto, la medida de la actividad biótica, a través de la producción de CO₂ en la respiración de los componentes bióticos (microorganismos y microbial), muestra que los suelos con menor intervención antrópica, son los que más mg CO₂/100 g produjeron.

2.3.3.2. Fauna del suelo

La composición de las comunidades de la macrofauna del suelo y su abundancia son indicadores de la biodiversidad del suelo y de la intensidad de las actividades biológicas. Poca información está disponible sobre la biodiversidad de la macrofauna del suelo en los bosques y sobre su resiliencia

frente a la deforestación o cambio de uso. En ese contexto, los bosques secundarios tienen un papel reconocido para la conservación de la biodiversidad del suelo que son poco estudiados (COTRINA, 2011).

ZERBINO (2005) menciona que los procesos que ocurren en el suelo son mediados por los organismos que lo habitan. Entre ellos se destaca la macrofauna, porque directa o indirectamente afecta la estructura y fertilidad del suelo. Las comunidades presentes están determinadas por el manejo que se realiza. Debido a su sensibilidad a las prácticas de manejo, la evaluación de la macrofauna del suelo conjuntamente con las propiedades del mismo, puede ser una herramienta útil para evaluar la sustentabilidad de las innovaciones tecnológicas que se proponen para el manejo de suelos y cultivos.

Los diversos organismos contribuyen con un amplio rango de servicios esenciales para el funcionamiento sustentable de los ecosistemas: intervienen en los ciclos de nutrientes, regulan la dinámica de la materia orgánica, secuestran carbono y regulan la emisión de gases invernadero, modifican la estructura física del suelo y actúan sobre el régimen del agua y la erosión. En consecuencia, mejoran la eficiencia en la adquisición de nutrientes por parte de las plantas y su estado sanitario respondiendo al manejo en escalas de tiempo de meses o años, por lo que tiene gran potencial para el uso como indicadores biológicos.

A través de sus actividades físicas (mezcla del mantillo con el suelo, construcción de estructuras y galerías, agregación del suelo) y metabólicas (utilización de fuentes orgánicas disponibles, desarrollo de

relaciones mutualistas y antagonistas) participan en muchos procesos. Al fragmentar las partículas, producir pelotas fecales y estimular la actividad microbiana intervienen en el ciclo de la materia orgánica y de nutrientes. Con la redistribución de la materia orgánica y de los microorganismos, la mezcla de suelo con partículas orgánicas y la producción de pelotas fecales causan mejoras en la agregación. También modifican la aireación e infiltración y la textura, a través de la construcción de galerías y al traer a la superficie y mezclar suelo de las capas inferiores del perfil.

Las propiedades físicas y químicas del suelo afectan a la fauna que lo habita de manera directa por el contenido de materia orgánica y de humedad, el pH, la estructura del suelo y la aeración y de forma indirecta a través del efecto que tienen sobre la vegetación (Dubs *et al.*, 2004; Swift *et al.*, 1976; citados por ZERBINO, 2005).

Guzmán (2000); citados por ACEVEDO *et al.* (2005) afirma que contrario a lo que sucede en los ecosistemas naturales, en los sistemas agrícolas, la compactación de los suelos es un factor que afecta considerablemente los cultivos de dos perspectivas. La primera es a nivel de producción, la cual tiende a disminuir conforme aumenta la compactación y la segunda es sobre la fauna del suelo, la cual se ve reducida considerablemente al aumentar la compactación.

Desde el momento que un sistema natural es modificado para desarrollar actividades agrícolas, los mayores cambios ocurren en las propiedades del suelo y en la abundancia, biomasa y diversidad de la biota del

suelo. Las comunidades presentes van a estar determinadas por la intensidad del cambio inducido respecto al ecosistema natural y por la habilidad de los organismos para adaptarse a esos cambios (Brown *et al.*, 2001; citados por ZERBINO, 2005).

Cuando la cobertura vegetal es diversa, como del campo natural, el mantillo es más heterogéneo y como consecuencia hay un incremento de los recursos a ser colonizados, lo que determina un aumento de la diversidad de la fauna del suelo. En sistemas de cultivos anuales intensivos se puede producir un progresivo deterioro de la materia orgánica y de la estructura del suelo con un aumento de la compactación; como resultado hay una reducción marcada en la complejidad y estabilidad de la comunidad biológica del suelo.

RAMIREZ *et al.* (s. d.) ponen de manifiesto, que el cambio de uso de la tierra genera variación en las poblaciones edáficas como respuesta a modificaciones en la cobertura vegetal, radiación solar, lluvia y propiedades físicas y químicas del suelo. La mayor densidad de los organismos bajo suelo virgen con zonas intervenidas permite inferir que las características edáficas y de microclima son óptimas para la recolonización por la macrofauna, la capa de material vegetal en diversos grados de descomposición ofrece alimento, protección del hábitat para la macrofauna, la disminución o ausencia en los sitios intervenidos es producto del efecto antrópico continuo.

Las prácticas de manejo que promueven la presencia de residuos en ausencia completa del laboreo conjuntamente a la diversificación espacial (pasturas mixtas) y temporal (rotaciones) de especies vegetales alojan

comunidades que presentan mayor riqueza, diversidad, y equitatividad, con predominio del grupo funcional detritívoros.

Según Morris (2000), citados por ZERBINO (2005) el pastoreo con rumiantes es otra práctica que afecta a la macrofauna del suelo, los efectos son causados a través del corte de la vegetación y del pisoteo, pero según ZERBINO (2005) es una perturbación que no altera la riqueza absoluta, la diversidad y equitatividad, pero sí la composición y abundancia de individuos por unidad de superficie. Para ZERBINO (2005) de las tres variables (riqueza, densidad y biomasa), la riqueza y la densidad son las que mejor reflejan las diferencias de vegetación y manejo de los distintos usos del suelo, las comunidades de la macrofauna del suelo son sensibles a los diferentes usos del suelo. En el caso del pastoreo rotativo, varía la composición de las comunidades y disminuye la abundancia de los individuos, sin embargo no hay cambios en la riqueza absoluta, diversidad, equitatividad; tal vez como consecuencia del pisoteo, el pastoreo parece afectar en mayor medida a las especies que desarrollan actividades sobre el suelo, como las hormigas (Hymenoptera) y cucarachas (Dictyoptera), mientras que se ven favorecidas especies asociadas a los excrementos frescos, como ciertas familias del Orden Coleoptera, en particular los Staphylinidae. En aquellas prácticas culturales menos intensivas y que promueven la acumulación de residuos, se ven favorecidos los detritívoros, en particular las lombrices (Oligochaeta).

En Colombia, en sistemas agrícolas con alto ingreso de insumos se produjo una dramática disminución de la riqueza, densidad y biomasa total de

la macrofauna del suelo, lo cual se atribuye al uso de agroquímicos, a la reducción en la producción de raíces y a la modificación en el microclima del suelo luego de la desaparición de la vegetación natural (Decäens *et al.*, 2001; citados por ZERBINO, 2005).

Estudios pilotos que se desarrollaron en el Valle de Talamanca, frontera de Costa Rica con Panamá en el 2008, sobre la calidad y macrofauna del suelo, obtuvo resultados preliminares que la composición y estructura de las comunidades de la macrofauna del suelo es parecida entre los cacaotales y los bosques primarios (COTRINA, 2011).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del campo experimental

La investigación se realizó en un fundo adyacente en la parte baja de la microcuenca del río Supte. Políticamente localizado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Geográficamente se localiza entre las siguientes coordenadas UTM: E 394527, N 8972450 y Altitud 660 m.s.n.m.

3.2. Características generales de la zona

3.2.1. Clima

La superficie de la parte baja de la microcuenca del río Supte se encuentra en la región Selva Alta o Rupa Rupa como lo clasifica PULGAR (1981), la altitud oscila entre los 650 a 1000 m.s.n.m. La precipitación media anual es de 3,400 mm, temperatura media anual 24.5 °C y con una humedad relativa media anual de 86%.

De acuerdo al sistema de clasificación de zonas de vida de HOLDRIDGE (1987) corresponde a la formación de bosque muy húmedo Pre montano Tropical (bmh - PT), donde se desarrollan y cultivan especies de gran

valor alimenticio, medicinales y comerciales, así como animales silvestres muchos de ellos en proceso de extinción

3.2.2. Geología

Geológicamente está constituida en gran parte por rocas calizas y en menor grado por limonitas y lutitas en proceso de edafización avanzada, pero en las zonas con pendientes más suaves o aquellas ubicadas en la base de los cerros, se observa depósitos de material detrítico fino y/o grueso derivado de estas mismas rocas.

3.2.3. Fisiografía y pendiente

El área de estudio pertenece al paisaje colinoso, la zona está conformada mayormente por laderas moderadamente disectadas y fuertemente disectadas, la pendiente varía desde ligeramente inclinada, hasta extremadamente empinada con valores que van de 15% a más.

3.3. Análisis estadístico

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA), siendo el factor variable las propiedades físicas (textura, resistencia a la penetración y la inestabilidad estructural del suelo), propiedades químicas (fósforo) y las propiedades biológicas (materia orgánica, respiración microbiana y fauna del suelo), se utilizó tres repeticiones por cada sistema con su respectivo análisis de varianza, en cada variable analizada, los resultados de las características evaluadas se sometieron al análisis de varianza y la significancia estadística mediante la prueba de Tukey a un nivel de 0.05 de probabilidad, asimismo para

ver la relación entre las propiedades usamos el método de regresión lineal múltiple y una estadística descriptiva, para mostrar las medias de resumen con gráficos y tablas.

Cuadro 5. Fuentes de variación de análisis de varianza y grados libertad en estudio.

Fuentes de variación	Grados de libertad*
Sistemas	6
Error	14
TOTAL	20

(*) G.L. de las variables en estudio

3.3.1. Sistemas

Se evaluaron siete sistemas de uso de suelo existentes en el todo el predio, el cual se les considero como tratamientos para poder adaptarse a un diseño estadístico y se describe:

- 1: Sistema de uso bosque
- 2: Sistema de uso con cacao
- 3: Sistema de uso con plátano
- 4: Sistema de uso con maíz
- 5: Sistema de uso con pasto
- 6: Sistema de uso con coca
- 7: Sistema de uso suelo degradado

3.3.2. Características físicas del suelo

a1: Textura

a2: Resistencia del suelo a la penetración

a3: Inestabilidad estructural del suelo

3.3.3. Propiedades químicas del suelo

b1: Fósforo total del suelo

3.3.4. Características biológicas del suelo

c1: Materia orgánica

c2: Respiración microbiana del suelo

c3: Fauna del suelo

3.3.5. Diseño experimental

Cuadro 6. Distribución de las variables en estudio

	B	R. P	I.E	M.O	P	Rm
N° de sistemas de uso de suelo	7	7	7	7	7	7
N° de áreas muestreadas por sistema	1	1	1	1	1	1
N° de puntos de muestreo por sistema	3	3	3	3	3	3
N° de muestras por punto	1	1	1	1	1	1

B: Biomasa, RP: Resistencia a la penetración, I.E: Inestabilidad Estructural, M.O: Materia Orgánica, P:

Fosforo, R.M: Respiración Microbiana

3.4. Metodología

3.4.1. Descripción de los sistemas de uso de suelo

3.4.1.1. Sistema de uso bosque secundario

Se evaluaron un sistema de bosque intervenido, donde hace muchos años se realizó la extracción de madera, pero aún conserva las especies nativas de la zona.

3.4.1.2. Sistema de uso con cacao

En los primeros años este sistema de producción de cacao (*Theobroma cacao* L), tenía maíz y plátano como sombra temporal y posteriormente incorporaron guaba (*Inga edulis*) como sombra permanente; hace 15 años realizaron el rozo y tumba de monte real para la instalación del cacao. La plantación ha sido instalada a un distanciamiento de 4 m x 4 m, haciendo un total de 833 plantas/ha.

3.4.1.3. Sistema de uso con plátano

Inicialmente hicieron el rozo, tumba y quema de monte real para la instalación del cultivo de coca y posteriormente instalaron el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca*), se encuentra en la parcela algunas malezas.

3.4.1.4. Sistema de uso con maíz

El sistema de producción cultivo de maíz (*Zea mays*), fue instalado en el año 2010, por lo que realizaron el rozo, la tumba y quema de una purma alta.

3.4.1.5. Sistema de uso con pasto

Es un sistema de pastura, instalado hace 20 años, previo a ello realizaron el rozo, tumba y quema de monte real, luego se introdujo el ganado caprino, el cual, sigue siendo usado como pastura, posteriormente incorporaron árboles frutales y árboles maderables de corto periodo.

3.4.1.6. Sistema de uso con coca

Es un sistema de producción de coca (*Erythroxylum coca*), instalado hace 15 años aproximadamente, previo a ello realizaron rozo, tumba y quema de monte real, este cultivo ha sido resembrado, en la actualidad es un sistema de uso intensivo con el cultivo de coca, donde se ha aplicado intensivamente agroquímicos y labranza de lampeo y aporque.

3.4.1.7. Sistema de uso extremadamente degradado

Es un sistema de suelo extremadamente degradado, donde hace 25 años se realizó el rozo, tumba y quema de monte real para instalar el cultivo de coca, en la actualidad es un área que se ha erosionado y ha perdido la capa superficial, dejándolo extremadamente degradado e improductivo.

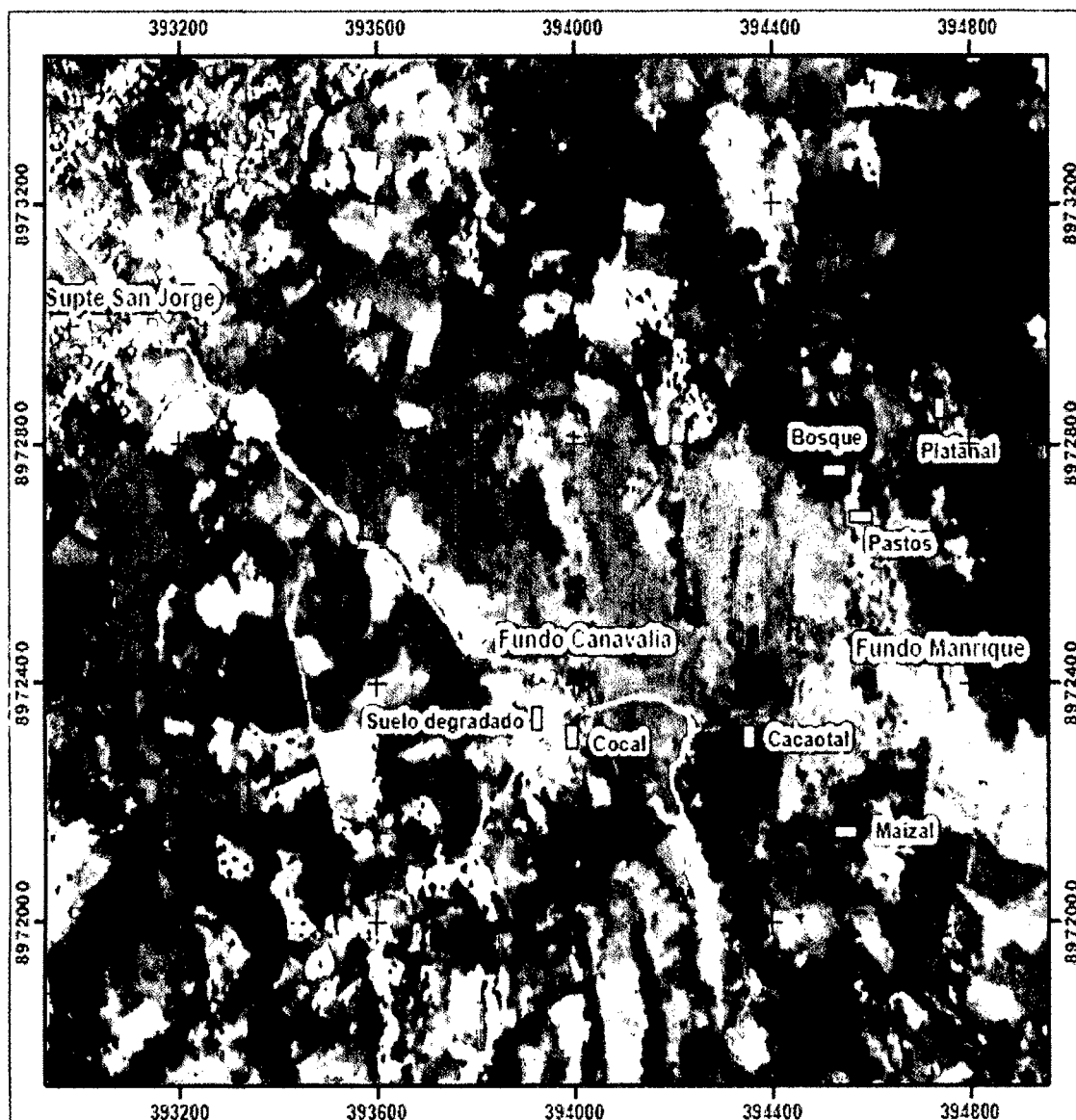


Figura 3. Imagen con la ubicación de las zonas de muestreo

3.4.2. Evaluaciones

3.4.2.1. Propiedades del suelo

La recolección de muestras de suelo en cada sistema o en cada unidad experimental se dio en tres puntos diferentes en toda el área (Figura 4), empleando una pala recta en cada punto determinado.

Esta unidad de muestreo es una mini calicata con un estrato de observación de 0-10 cm de profundidad.

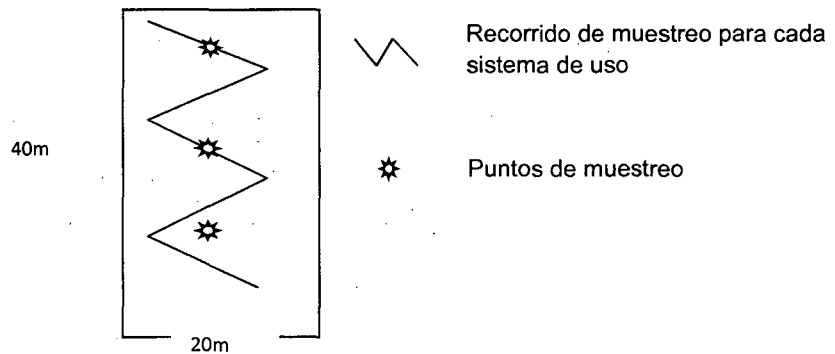


Figura 4. Diagrama de muestreo en cada sistema

La resistencia a la penetración del suelo se determinó *in situ*; para las demás propiedades las muestras fueron colectadas y transportadas al Laboratorio de Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en el referido laboratorio las muestras fueron ordenadas y rotuladas para luego evaluar las propiedades de respiración microbiana y fauna del suelo. Para los análisis de textura, inestabilidad estructural, materia orgánica y fósforo las muestras fueron previamente secadas.

3.4.2.1.1. Propiedades físicas

a. Textura (método del hidrómetro)

Para su determinación se utilizó el siguiente procedimiento:

- Se pesó 50 g de suelo (TFSA) y se colocó en un vaso de dispersión.
- Se añadió 15 mL. de hexametáfosfato de sodio al 10%, completándolo con agua destilada hasta aproximadamente 2/3 del vaso de dispersión.

- Se agitó por 5 minutos en el dispersador eléctrico y se transvasó la suspensión a la probeta de sedimentación asegurándonos de que no quede partículas de suelo adheridas a la pared del vaso (se usó una pipeta con agua destilada para ayudarnos).
- Se colocó cuidadosamente el hidrómetro dentro de la probeta y se añadió agua destilada hasta la marca de 1130 cc.
- Se retiró el hidrómetro y agitó energéticamente la suspensión, utilizando el agitador manual y se efectuó la primera lectura a los cuarenta segundos, después lo dejamos en reposo. Para leer el hidrómetro, se aplicó 1 gota de alcohol amílico para que desaparezca las burbujas.
- Se tomó la temperatura de la suspensión y se anotó junto con la lectura del hidrómetro en el cuadro de resultados, se dejó la probeta en reposo durante dos horas para tomar la segunda lectura del hidrómetro y la temperatura de la suspensión, registrando los resultados.
- Se utilizó la siguiente ecuación para realizar los cálculos y determinar la clase textural:

$$\% \text{ arena} + \% \text{ limo} + \% \text{ arcilla} = 100\%$$

$$\% \text{ limo} + \% \text{ arcilla} = \frac{\text{Lectura corregida a los 40"}}{\text{Peso seco de la muestra}} \times 100$$

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{\text{Lectura corregida a las 2h}}{\text{Peso seco de la muestra}} \times 100$$

$$\% \text{ Limo} = (\% \text{ limo} + \% \text{ arcilla}) - \% \text{ arcilla}$$

$$\% \text{ Arena} = 100\% - (\% \text{ limo} + \% \text{ arcilla}).$$

b. Resistencia a la penetración (método directo - penetrómetro)

Para su determinación se utilizó el siguiente procedimiento:

- Se ubicó los puntos de muestreo y elaboró un pequeño hoyo de 15 cm de lado, de 10 cm de profundidad.
- Se midió la resistencia del suelo con un penetrómetro de forma horizontal en tres puntos como lo indica la figura.

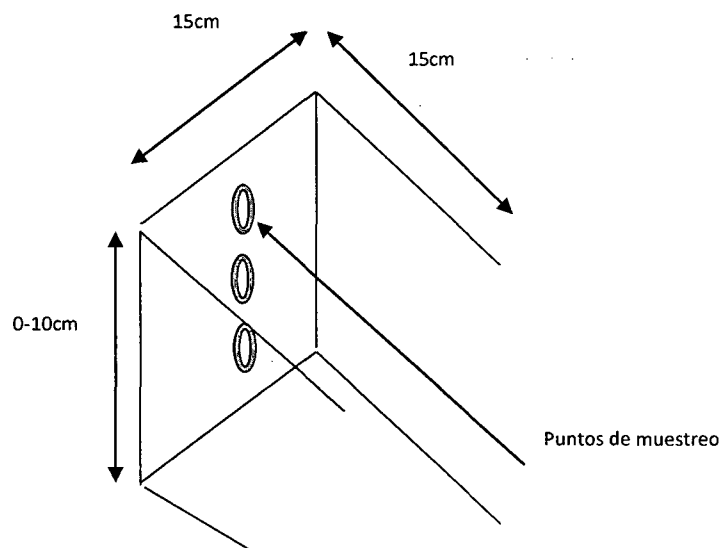


Figura 5. Muestreo de la resistencia a la penetración

c. Inestabilidad estructural (método de cloruro de potasio)

Para su determinación se utilizó el siguiente procedimiento:

- Se extrajeron las muestras sin disturbar a profundidad de 0 - 10 cm. Se dejó secar al aire bajo sombra, luego se desmenuzaron a mano y fueron tamizados (2 mm).
- En una probeta de 50 mL se colocó 25 g de muestra y se enrasó a 40 mL con agua destilada, y se dejó reposar por media hora.
- Simultáneamente en otra probeta de 50 mL se colocó 15 g de muestra y enrasó a 40 mL con una solución de Cloruro de Potasio a 1 N, y se dejó reposar durante media hora también.
- Luego se agitó ambas probetas, con una varilla, de forma vertical y circular, suavemente por tres veces con intervalos de media hora y se dejó reposar ambas probetas por espacio de 24 horas.
- Al finalizar este tiempo se anotó los volúmenes de sedimentación de ambas probetas. La diferencia de volúmenes representa el índice de inestabilidad estructural, cuando mayor es la diferencia; considerándose la estructura estable si no hay diferencia de sedimentación entre ambas.

3.4.2.1.2. Propiedades químicas

a. Fósforo (método de Olsen modificado)

Para su determinación se realizó el siguiente procedimiento:

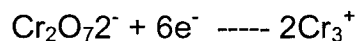
- Se pesó 2 g de suelo y se colocó en el vaso de precipitación.
- Se agregó 20 mL de bicarbonato de sodio 0.5 M (pH 8.5) y carbón libre de fósforo.
- Se agitó por 10 minutos y lo filtramos.

- Del filtrado se tomó una alícuota de 3 mL, se agregó 10 mL de molibdato de amonio, que contiene 0.01 g de ácido ascórbico por muestra y se mezcló inmediatamente.
- Se torna de color azul cuando hay fósforo en la muestra y por último se lee en el espectrofotómetro a una banda de 660 nm, después de 5 minutos.

3.4.2.1.3. Propiedades biológicas

a. Materia orgánica (método de Walkley y Black)

Corresponde al método de la combustión húmeda, que consiste en determinar el carbono presente en la materia orgánica del suelo fácilmente oxidable por el dicromato de potasio (KCr_2O_7) en un medio ácido (ácido sulfúrico). El dicromato actúa capturando los electrones liberados en la combustión, reduciéndose el Cr.



Para determinar el contenido de materia orgánica de una muestra de suelo se realizó el siguiente procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo y se depositó en un Erlenmeyer de 250 mL, agregamos 10 mL de bicromato de potasio 2 N y se añadió 10 mL de ácido sulfúrico Q.P 96%.

- Mezclamos para homogenizar la solución y se dejó reposar por 2 horas a más, se llevó a volumen de 100 mL. con agua destilada y se tomó una alícuota de 20 mL.
- Se llevó esta solución a un vaso precipitado para titularlo; agregando de 2 a 3 gotas de indicador dedifenilamina sulfúrica. Titulamos con sal de Mohr 0.2 N. El cambio de color verde oscuro a verde brillante indicará el final de la titulación; se anotó el gasto de la solución de Mohr, paralelo a esto se realizó un blanco (sin muestra).
- Se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ M.O.} = \frac{(a - bf) 0.003 \times 1.724}{P} \times 100$$

Donde,

a = mL de bicromato de potasio utilizado.

b = mL de sal ferrosa o sal de Mohr gastado (gasto de titulación).

0.003 = Factor del carbón.

1.724 = Factor de Van Vammelen.

p = peso de muestra de suelo.

b. Respiración microbiana (método de titulación por hidróxido de sodio)

Para su determinación se realizó el siguiente procedimiento:

- Se tomaron 100 g de suelo, los cuales se introdujeron en frascos transparentes de boca ancha y se distribuyeron en el fondo de tal manera que la capa de suelo quedara lo más fina posible (aproximadamente 2 cm).

- Sobre la lámina de suelo se colocó un tubo de ensayo con 8 mL de NaOH (0.6 N).
- Se sellaron herméticamente cada uno de los frascos y se colocaron en un espacio oscuro a temperatura ambiente. Se hicieron 2 lecturas cada 24 horas.
- Paralelamente se preparó un testigo en el cual se colocó sólo NaOH, sin suelo.
- Para titular se agregó 5 mL de solución de cloruro de bario 2 N y tres gotas de fenolftaleína 1% a cada tubo de ensayo; en seguida se tituló el NaOH de cada tubo de ensayo con HCl (0.6N).
- Para hacer la segunda lectura, se colocaron nuevamente 8 mL de soda en cada tubo de ensayo.
- El cálculo de CO₂ – C liberado se determinó con la siguiente fórmula:

$$\frac{mg \text{ Co}_2 - C}{100gr \text{ S}} = \frac{\text{gasto en ml HCl}(\text{blanco}) - \text{gasto en ml HCl}(\text{muestra})}{100 gr \text{ S}} \times 0.6 \times 6$$

c. Fauna del suelo

Se realizó con el método del Programa Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), (LINARES, 2007):

- Se muestreó en cada parcela de 0 a 10 cm de profundidad, se colocaron en bolsas de polietileno para su traslado al Laboratorio de Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- En el laboratorio se procedió a extraer a los organismos encontrados con la ayuda de pinzas, colocándolos en frascos de vidrio debidamente rotulados

con solución alcohol 90% y formol al 5%; para luego ser identificados a nivel de orden con ayuda de un estereoscopio y una guía de identificación, para luego contarlos y determinar la densidad y el índice de diversidad de especies.

c.1. Densidad (método de Correia y Oliveira)

Dado que para cada muestreo se utilizó un cuadrado de 25 cm de lado, lo que representa $1/16 \text{ m}^2$, los datos de cada punto de muestreo son multiplicados por 16 para obtener las unidades de número de individuos por m^2 (ind/m^2) (CORREIA Y OLIVEIRA, 2000).

c.2. Índice de diversidad de especies (método de Shannon Wiener)

La diversidad se representa como la riqueza o diversidad de la comunidad de un área, siendo ésta el número de especies presentes para un nivel taxonómico prefijado. Para determinar el índice de diversidad de especies se utilizó el método de Shannon Wiener.

Riqueza de especies (S): Es el número de especies o unidades taxonómicas encontradas en los diferentes sistemas de uso del suelo

Índice de Shannon-Wiener (H'):

$$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

Donde:

S = Número de especies o unidades taxonómicas

$$p_i = n_i/N$$

n_i = Abundancia de la especie i

N = Abundancia total

\ln = logaritmo natural

Índice de Equidad (J):

$$J = \frac{H'}{\ln S}$$

Donde:

H' = Índice de diversidad de Shannon-Wiener

S = Número de especies o unidades taxónomicas

\ln = logaritmo natural

3.4.2.1.4. Aporte de biomasa

a. Biomasa arbustiva/herbácea (t/ha)

La determinación de la biomasa arbustiva y herbácea de los 7 sistemas de uso de suelo de Supte San Jorge, se determinó por muestreo directo, usando una rafia para formar el cuadrante de 1 m x 1 m y cortando la vegetación que queda dentro de éste a nivel del suelo; luego estas muestras fueron trasladadas al laboratorio de Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para registrar el peso fresco total del metro cuadrado, del cual se obtuvo una sub muestra de peso conocido que se desecó en estufa a 75 °C hasta obtener el peso constante.

Finalmente para estimar la biomasa en t/ha de cada sistema de uso, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{BAH (t/ha)} = ((\text{PSM}/\text{PFM}) * \text{PFT}) * 0.01$$

Donde,

BAH = Biomasa arbustiva/herbácea, materia seca

PSM = Peso seco (g) de la muestra colectada

PFM = Peso fresco (g) de la muestra colectada

PFT = Peso fresco total (g)

0.01 = Factor de conversión

b. Biomasa de hojarasca (t/ha)

Se recolectó y se pesó la hojarasca acumulada en los sub cuadrantes de 0.5 m x 0.5 m (0.25 m²), y de esta se tomó una sub muestra de valor arbitrario, que se envió a laboratorio para el secado a estufa hasta alcanzar el peso constante. Luego para determinar la biomasa de hojarasca se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Bh (t/ha)} = ((\text{PSM}/\text{PFM}) * \text{PFT}) * 0.04$$

Donde,

Bh = Biomasa de la hojarasca, materia seca (t/ha)

PSM = Peso seco (g) de la muestra colectada

PFM = Peso fresco (g) de la muestra colectada

PFT = Peso fresco total (g)

0.04 = Factor de conversión

IV. RESULTADOS

4.1. Propiedades físicas y químicas del suelo

4.1.1. Textura en los diferentes sistemas de uso del suelo

Cuadro 7. Contenido de arena, limo y arcilla (%) en los diferentes sistemas de uso del suelo

Sistemas	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Bosque	42.103	26.209	31.688	FrAr
Cacao	40.103	22.209	37.688	FrAr
Plátano	38.103	28.209	33.688	FrAr
Maíz	34.103	48.209	17.688	Fr
Pasto	40.103	32.209	27.688	FrAr
Coca	35.688	22.209	42.103	Ar
Degradado	34.103	10.209	55.688	Ar

FrAr: Franco arcilloso, Fr: Franco, Ar: Arcilloso

La textura en los sistemas de uso con bosque, cacao, plátano y pasto corresponden a suelos franco arcilloso, lo que significa que presentan una textura moderadamente fina (Cuadro 7).

4.1.2. Resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo

Cuadro 8. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo.

	Suma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F	Sig.
Sistemas	21.629	6	3.605	80.259	**0.000
Residual	0.629	14	0.045		
Total	22.258	20			

** : Alta significancia estadística al 5% de probabilidad.

Cuadro 9. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo.

SISTEMAS	N	Subconjunto para alfa= 0.05			
		2	3	4	1
Bosque	3	1.6700 ^a			
Maíz	3	2.2233 ^a	2.2233 ^b		
Cacao	3		2.8067 ^b	2.8067 ^c	
Plátano	3			2.8900 ^c	
Pasto	3				4.1667 ^d
Coca	3				4.2200 ^d
Degradado	3				4.5000 ^d
Sig.		0.073	0.054	0.999	0.496

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a: Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

El cuadro 9, nos indica que existen diferencias significativas entre los diferentes sistemas de uso del suelo y efectuada la prueba de Tukey el suelo del sistema de uso con Bosque es el que presenta la menor resistencia a la penetración.

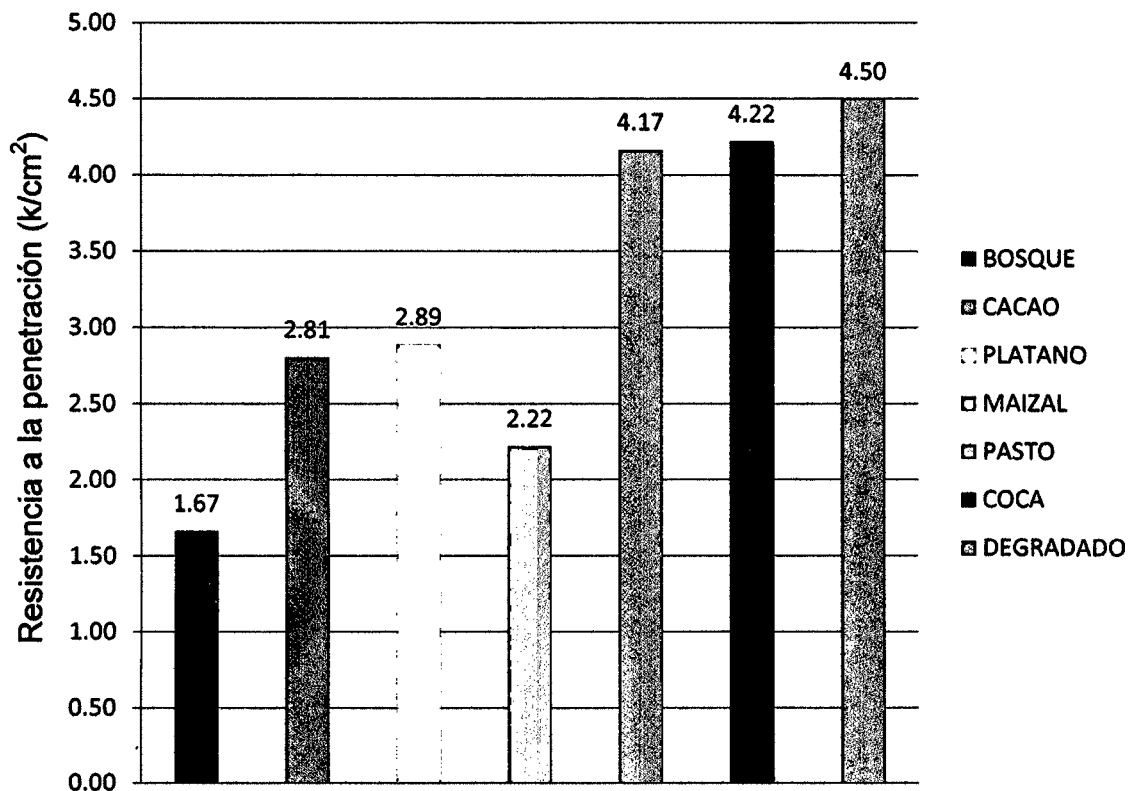


Figura 6. Resistencia a la penetración (k/cm²), en los diferentes sistemas de uso del suelo.

En la Figura 6 se puede apreciar los valores promedios de resistencia a la penetración en los siete sistemas de uso de suelo de Supte San Jorge.

4.1.3. Inestabilidad estructural en los diferentes sistemas de uso del suelo

Cuadro 10. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la inestabilidad estructural en los diferentes sistemas de uso del suelo.

SISTEMAS	N	Subconjunto para alfa= 0.05			
		2	3	4	1
Cacao	3	49.3200 ^a			
Bosque	3	52.8333 ^a	52.8333 ^b		
Maíz	3	53.0333 ^a	53.0333 ^b		
Plátano	3	54.5800 ^a	54.5800 ^b	54.5800 ^c	
Pasto	3		58.5433 ^b	58.5433 ^c	
Coca	3			61.5900 ^c	61.5900 ^d
Degradado	3				66.3633 ^d
Sig.		0.213	0.151	0.051	0.302

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a: Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

Cuadro 11. Análisis de varianza de la inestabilidad estructural en los diferentes sistemas de uso del suelo.

	Suma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F	Sig.
Sistemas	623.959	6	103.993	16.299	**0.000
Residual	89.324	14	6.380		
Total	713.283	20			

** : Alta significancia estadística al 5% de probabilidad.

En el cuadro de ANOVA, observamos que existen diferencias significativas entre los diferentes sistemas de uso del suelo. Según la prueba de Tukey el sistema de cacao es el que presenta una menor inestabilidad estructural.

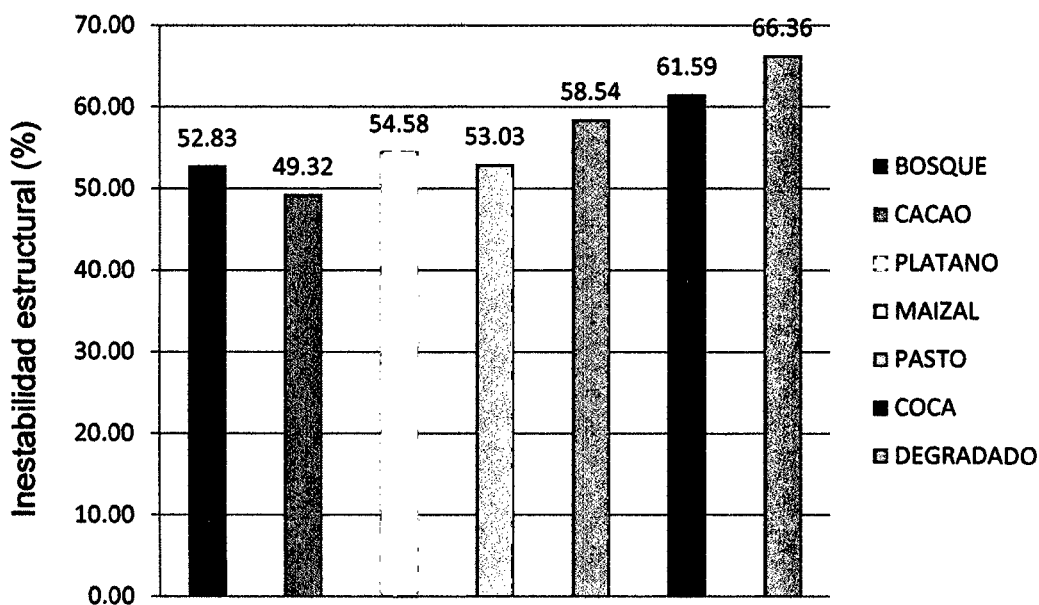


Figura 7. Inestabilidad estructural (%), en los diferentes sistemas de uso del suelo.

4.1.4. Contenido de fósforo (P) en los diferentes sistemas de uso del suelo

Cuadro 12. Análisis de varianza del contenido de fósforo en los diferentes sistemas de uso del suelo.

	Suma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F	Sig.
Sistemas	66.287	6	11.048	11.466	**0.000
Residual	13.490	14	0.964		
Total	79.776	20			

** : Alta significancia estadística al 5% de probabilidad.

Cuadro 13. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia del fósforo en los diferentes sistemas de uso del suelo.

SISTEMAS	N	Subconjunto para alfa= 0.05		
		2	3	1
Degradado	3	5.4021 ^a		
Coca	3	6.1705 ^a	6.1705 ^b	
Pasto	3	6.6827 ^a	6.6827 ^b	
Cacao	3	8.0100 ^a	8.0100 ^b	
Plátano	3		8.3767 ^b	
Bosque	3		8.6154 ^b	8.615 ^c
Maíz	3			11.177 ^c
Sig.		0.066	0.094	0.073

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a: Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

El cuadro de ANOVA, nos indica que existen diferencias significativas entre los diferentes sistemas de uso del suelo. Efectuando la prueba de Tukey concluimos que el sistema de uso con maíz presenta un mayor contenido de fósforo.

En la Figura 8 se puede apreciar los valores promedios del contenido de fósforo en ppm en los siete sistemas de uso de suelo. El contenido más bajo se observa en el sistema de uso con suelo degradado, con un valor de 5.40 ppm, el valor más alto se aprecia en el sistema de uso con Maíz de 11.18 ppm, esto puede deberse a la aplicación de fertilizantes fosfóricos, propio de un sistema agrícola.

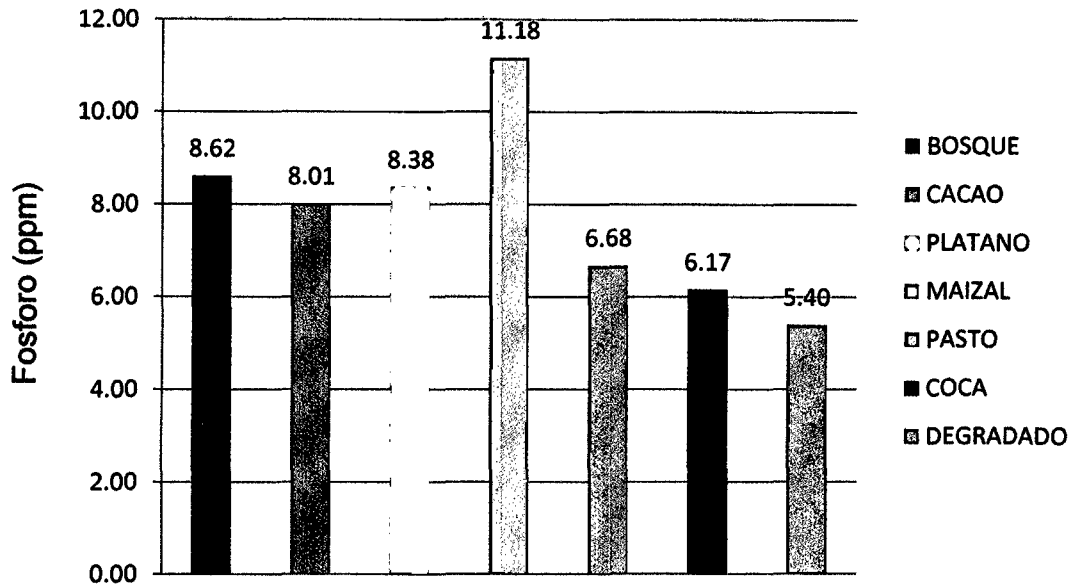


Figura 8. Contenido de fósforo (ppm), en los diferentes sistemas de uso del suelo

4.2. Propiedades biológicas del suelo

4.2.1. Contenido de materia orgánica (MO) en los diferentes sistemas de uso del suelo

Cuadro 14. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la materia orgánica en los diferentes sistemas de uso del suelo.

SISTEMAS	N	Subconjunto para alfa= 0.05				
		2	3	4	5	1
Degradado	3	1.3900 ^a				
Coca	3	1.7567 ^a				
Plátano	3		2.6867 ^b			
Maíz	3		3.2467 ^b	3.2467 ^c		
Pasto	3			3.4467 ^c	3.446 ^d	
Bosque	3				3.880 ^d	3.880 ^e
Cacao	3					4.380 ^e
Sig.		0.401	0.071	0.902	0.235	.128

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a: Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

El cuadro de ANOVA, nos indica que existen diferencias significativas entre los diferentes sistemas de uso del suelo y efectuado la prueba Tukey, el sistema de cacao es el que presenta un mayor contenido de materia orgánica.

Cuadro 15. Análisis de varianza de la materia orgánica en los diferentes sistemas de uso del suelo.

	Suma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F	Sig.
Sistemas	21.506	6	3.584	78.646	**0.000
Residual	0.638	14	0.046		
Total	22.144	20			

** : Alta significancia estadística al 5% de probabilidad.

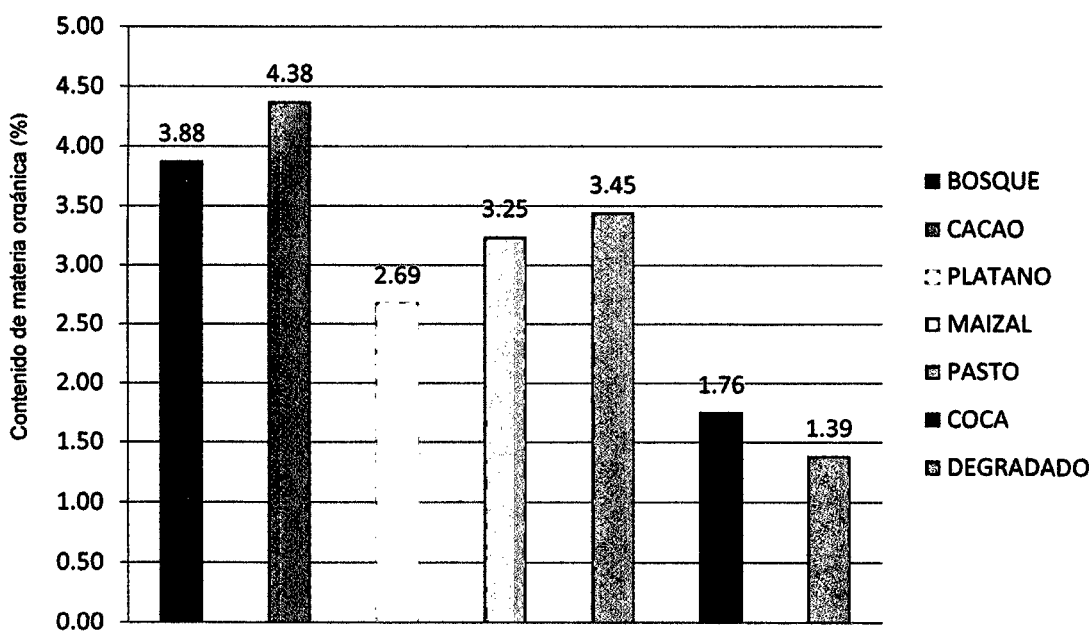


Figura 9. Contenido de materia orgánica (%), en los diferentes sistemas de uso del suelo.

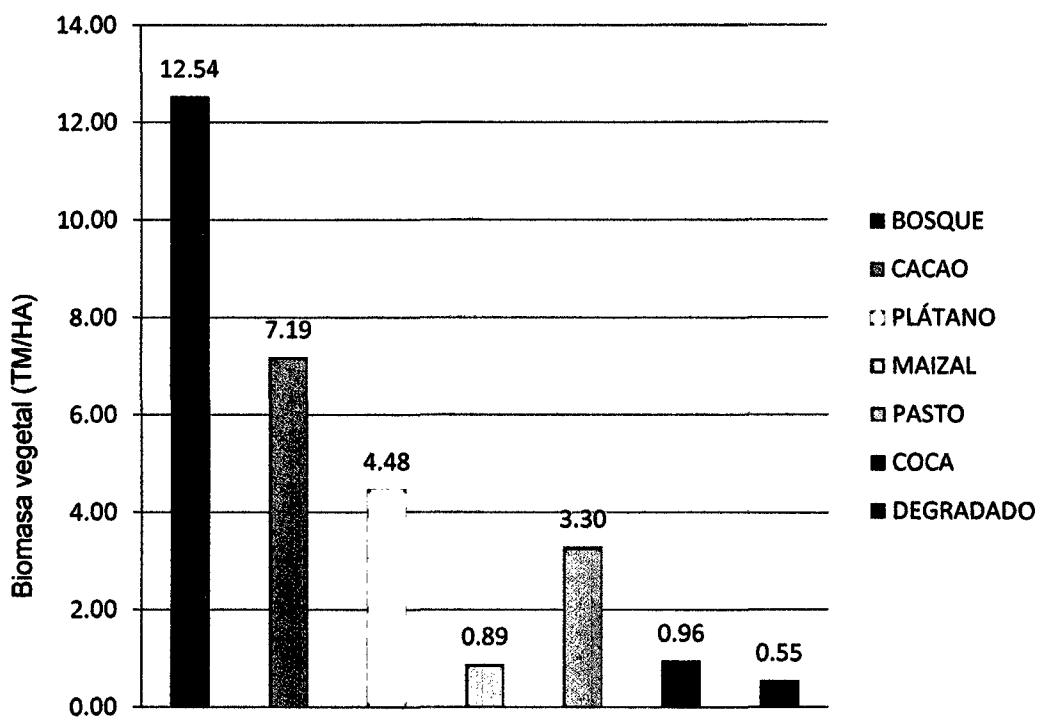


Figura 10. Biomasa vegetal del suelo (t/ha), en los diferentes sistemas de uso

4.2.2. Respiración microbiana

Cuadro 16. Análisis de varianza de la respiración microbiana en los diferentes sistemas de uso del suelo.

	Suma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F	Sig.
Sistemas	0.011	6	0.002	464.819	**0.000
Residual	0.000	14	0.000		
Total	0.011	20			

** : Alta significancia estadística al 5% de probabilidad.

Cuadro 17. Prueba de Tukey al 0,05 de significancia de la respiración microbiana en los diferentes sistemas de uso del suelo.

SISTEMAS	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
		2	3	4	5	6	1
Degradado	3	.02298 ^a					
Coca	3		.0453 ^b				
Pasto	3			.0540 ^c			
Maíz	3				.062 ^d		
Plátano	3					.0687 ^e	
Cacao	3					.0709 ^e	
Bosque	3						.1025 ^f
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	.823	1.000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a: Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

En el cuadro de ANOVA, observamos que existen diferencias significativas entre los diferentes sistemas. Según la prueba de Tukey, el sistema bosque es el que presenta una mayor respiración microbiana.

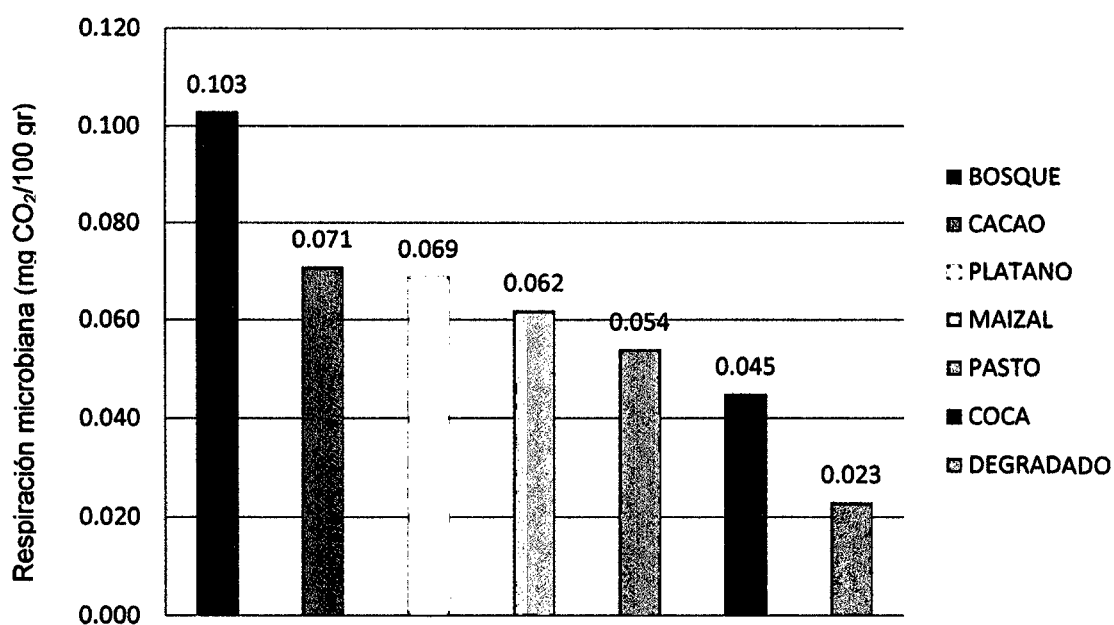


Figura 11. Respiración microbiana (mg CO₂/100 g suelo), en los diferentes sistemas de uso del suelo.

En la Figura 11, se puede observar los valores de respiración microbiana en $\text{mg CO}_2/100 \text{ g}$ de suelo en cada sistema de uso de suelo; donde el bosque presenta la mayor respiración con $0.103 \text{ mg CO}_2/100 \text{ g}$ suelo, seguido del sistema de cacao, plátano, maíz y pasto con 0.071 , 0.069 , 0.062 y $0.054 \text{ mg CO}_2/100 \text{ g}$ suelo respectivamente, y los menores valores de respiración son para el sistema de uso con coca y degradado con 0.045 y $0.023 \text{ mg CO}_2/100 \text{ g}$ suelo.

4.2.3. Cantidad de macrofauna en los sistemas de uso del suelo

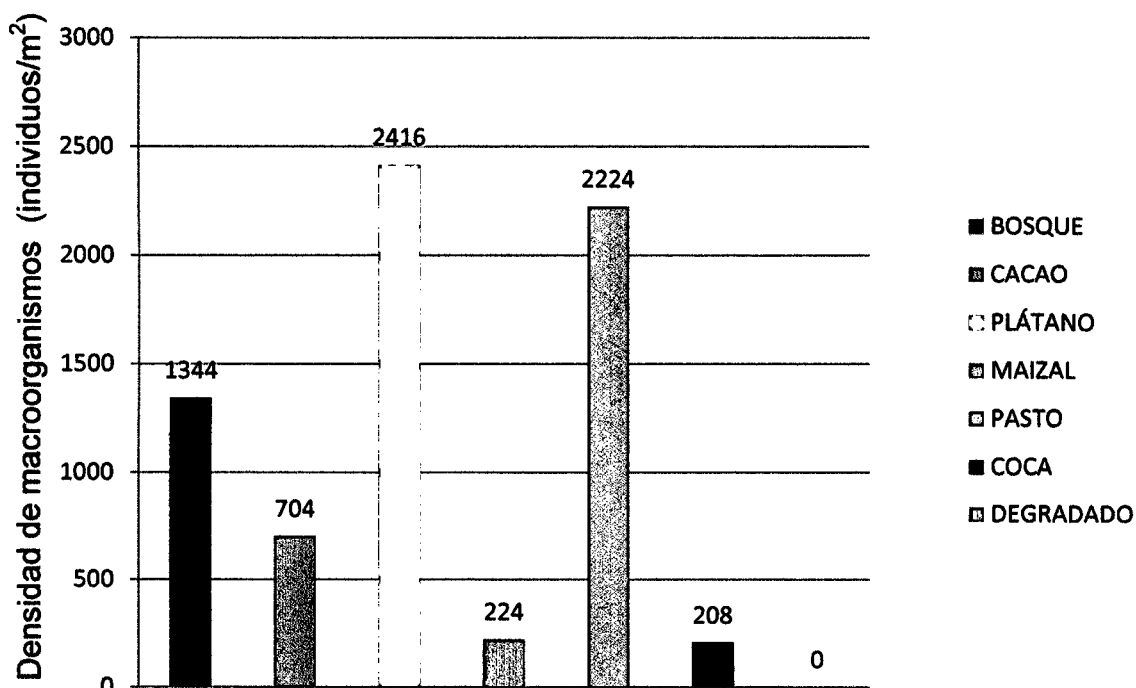


Figura 12. Densidad de macroorganismos (individuos/m²) en los diferentes sistemas de uso del suelo.

En la Figura 12, se observa los valores promedios de densidad de macroorganismos encontrados en los diferentes sistemas de uso de suelo en Supte San Jorge, indicando que entre todos los sistemas de plátano y pasto presentan una mayor densidad de macroorganismos con 2,416 y 2,224 individuos/m² respectivamente, el sistema de uso con bosque y cacao tienen una densidad media con 1,344 y 704 individuos/m² respectivamente, en el sistema de uso con maíz y coca se obtuvo una densidad baja con 224 y 208 individuos/m² respectivamente y en el suelo degradado no se encontró ningún organismo.

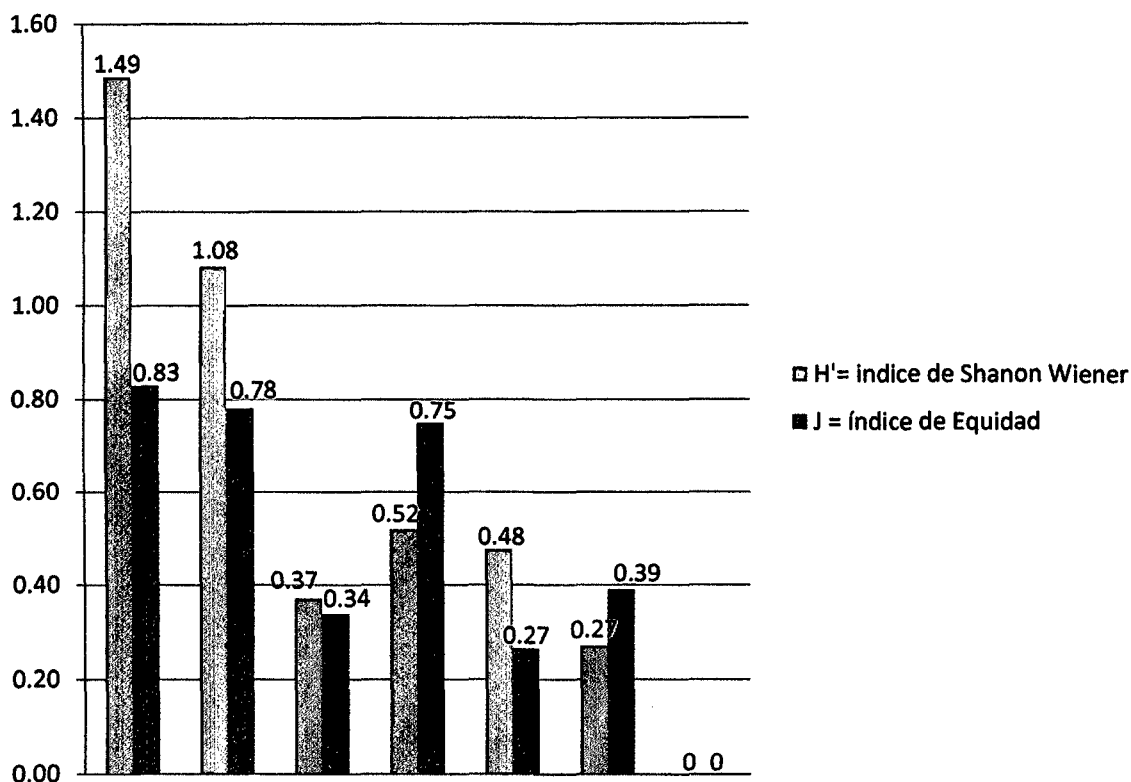


Figura 13. Índice de Shannon Wiener y el Índice de Equidad, en los diferentes sistemas de uso del suelo.

En la Figura 13, se aprecia que el bosque presenta una mejor diversidad con 1.49, seguido del sistema de uso con cacao con 1.08, luego el maíz, pasto, plátano y coca con 0.52, 0.48, 0.37 y 0.27 respectivamente, por último el suelo degradado con ningún valor.

4.3. Relación entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

De acuerdo al cuadro de resumen (Anexo A), observamos que la resistencia a la penetración, inestabilidad estructural, materia orgánica, biomasa, respiración microbiana, índice de Shannon y el índice de equidad, son buenos indicadores de calidad. Esta afirmación obedece a la siguiente lógica, el suelo del sistema de uso con bosque son de mayor calidad que un suelo degradado, ésta última se ha alterado en sus propiedades físicas, químicas y biológicas alterando su calidad.

Asimismo en el Cuadro 19, observamos el modelo de las variables que tienen mayor relación entre las propiedades.

Cuadro 19. Modelo de las variables

Variable	Modelo
Resistencia a la penetración (rp)	$12.918 - 0.349 P - 22.464 \text{ Respiración} - 2.434 \text{ IEQUIDAD}$
Inestabilidad estructural (ie)	$59.026 + 2.220 rp - 3.546 \text{ MO} - 77.067 \text{ Respiración} - 26.954 \text{ IEQUIDAD}$
Materia Orgánica (MO)	$24.619 - 0.335 ie - 36.153 \text{ Respiración} + 5.577 \text{ ISHANON} - 9.155 \text{ IEQUIDAD}$

Biomasa	- 1.747 + 66.172 Respiración + 12.031 ISHANON - 12.506 IEQUIDAD 1.167 - 0.017 ie - 0.052 MO + 0.323 ISHANON - 0.484
Respiración	IEQUIDAD
ISHANON	- 3.620 - 0.039 rp+ 0.161 MO + 0.016 Biomasa + 3.101 Respiración + 1.502 IEQUIDAD
IEQUIDAD	2.410 - 0.035 ie - 2.065 Respiración

V. DISCUSIÓN

5.1 De las propiedades físicas y químicas del suelo

5.1.1 Textura en los diferentes sistemas de uso del suelo

El suelo del sistema de uso con maíz es de textura franco, es por ello que el suelo corresponde a una permeabilidad media, una capacidad de retención de agua media, una buena aireación y nutrientes entre medio y alto de acuerdo al Cuadro 1, lo que significa que deben presentar las mejores condiciones físicas y químicas propuesto por ESCARLATA (2011). Los resultados reflejan que hay una resistencia a la penetración adecuada para el cultivo (Figura 6), una inestabilidad media entre todos los sistemas (Figura 7) y un contenido de materia orgánica medio (Figura 9).

El suelo del sistema de uso de coca y degradado presentó una textura arcillosa, lo que significa que tiene una permeabilidad nula, elevada capacidad de retención de agua y nutrientes, baja porosidad y como consecuencia mala aireación (Cuadro 1), por este motivo ESCARLATA (2011), los denomina como terrenos difíciles de trabajar, ya que poseen una elevada viscosidad que ofrece una gran resistencia a la penetración de raíces, lo que corroboramos con los resultados obtenidos (Figura 6).

5.1.2 Resistencia a la penetración en los diferentes sistemas de uso del suelo

El sistema de uso bosque presenta el valor más bajo con 1.67 k/cm^2 y es corroborado por FERRERAS *et al.* (2007) y SADEGHIAN, *et al.*, (s.d.) quienes encontraron valores inferiores en suelo quasi-prístino, este valor representa a suelos suaves según ICT (2004) (Cuadro 2). A pesar que este suelo presenta una textura franco arcilloso (Cuadro 7), que nos arrojaría a valores más altos de resistencia a la penetración, sin embargo aquí se aprecia el efecto del contenido alto de materia orgánica (Figura 9), que al formar mayor agregados ayudaría a la formación de una buena estructura, por lo tanto habrá menos resistencia a la penetración del suelo.

Los suelos de los sistemas de uso con cacao, plátano y maíz presentan valores de 2.81, 2.89 y 2.22 k/cm^2 respectivamente, todos ellos considerados de acuerdo a la clasificación del ICT (2004) como suelos duros (Cuadro 2). Para el cultivo de maíz Forsythe *et al.* (2005), citado por HERNRÍQUEZ *et al.* (2011) determinó que el valor crítico de resistencia a la penetración de 2.75 k/cm^2 . Por lo tanto 2.22 k/cm^2 es inferior a ese valor.

Los sistemas de uso con pasto, coca y suelo degradado superan grandemente a los valores de los otros sistemas con 4.17, 4.22 y 4.50 k/cm^2 respectivamente, clasificándolos según ICT (2004) como suelos extremadamente duros (Cuadro 2). En el caso del suelo del sistema de uso con pasto, se debe al pisoteo del ganado caprino, resultado que corrobora al obtenido por Stankoviocova *et al.* (2008); citado por HENRÍQUEZ *et al.* (2011)

quienes encontraron valores altos con una tendencia a la disminución de la variable al aumentar la profundidad. En el caso de los suelos de los sistemas de uso con coca y degradado la resistencia a la penetración estaría siendo influenciado por la textura arcillosa (Cuadro 7), bajo contenido de materia orgánica (Figura 9), por la aplicación de pesticidas (herbicidas e insecticidas) usados en el cultivo de coca. Además podemos agregar al efecto de la labranza intensiva, manifestada por Jiménez *et al.* (1992); citado por RAMIREZ y SALAZAR (2006), que encontraron el valor más alto, en suelos con 20 años de labranza, indicándonos que la labranza afecta a las propiedades físicas del suelo, haciendo que la resistencia a la penetración sea mayor disminuyendo la superficie específica de absorción de las raíces.

5.1.3 Inestabilidad estructural en los diferentes sistemas de uso del suelo

Los suelos de los sistemas de uso con pasto, coca y degradado, resultaron ser más inestables estructuralmente con valores 58.54, 61.59 y 66.36% respectivamente, en el caso del sistema de uso con pasto es inestable a pesar que contiene mayor contenido de materia orgánica en este grupo, puede deberse al sobre pastoreo, en los otros por su bajo contenido de materia orgánica, pero en los tres casos su alto índice de resistencia a la penetración explicaría sus inestabilidad aumentando la susceptibilidad a la compactación (FERRERAS *et al.*, 2007).

El sistema de cacao presenta la menor inestabilidad estructural con 49,32%, indicando que es el sistema más estable estructuralmente de todos,

posiblemente como consecuencia de la presencia del alto contenido de materia orgánica (Figura 9).

5.1.4 Contenido de fósforo (P) en los diferentes sistemas de uso del suelo

Desde el punto de vista nutricional el suelo del sistema de uso con maíz, bosque, plátano y cacao con 11.18, 8.62, 8.38 y 8.01 ppm respectivamente, son clasificados como nivel medio en fósforo (Cuadro 4), esto se debe al contenido alto y medio de materia orgánica que presentan estos sistemas, ya que cuanto más contenido de materia orgánica tenga el sistema, el suelo poseerá mayores nutrientes. En el caso de los sistemas de uso con pasto, coca y suelo degradado son de nivel bajo (Cuadro 4).

5.2 De las propiedades biológicas del suelo

5.2.1 Contenido de materia orgánica (MO) en los diferentes sistemas de uso del suelo

El contenido de materia orgánica fue más elevado en el sistema de cacao con 4.38% (Figura 9), GASTEIZ (s. d.) en su cuadro de materia orgánica en el suelo, menciona que este porcentaje representa un nivel alto en materia orgánica y los sistemas de uso con bosque, plátano y maíz por contener 3.88, 2.69 y 3.25% respectivamente, representan a un nivel medio en materia orgánica; esto puede deberse al contenido considerable de biomasa vegetal obtenidos en los sistemas (Figura 10), ya que Altieri (1999) y Gliessman (2002); citados por MONTENEGRO (2005) manifiesta que las hojas caídas juegan un

papel importante al proveer cobertura al suelo modificando el ambiente edáfico, conforme se descompone, esta hojarasca se convierte en fuente importante de materia orgánica y activando el ciclo biogeoquímico.

En el caso específico del sistema de uso con pasto, el contenido de materia orgánica es de 3.45%, mayor que en los sistemas de plátano y maíz, clasificándolo según GASTEIZ (s. d.) como un nivel medio, este incremento puede ser por el estiércol del ganado caprino o en su debido caso por la disminución de la tasa de transformación de la materia orgánica como consecuencia de las condiciones no propicias, causada por el pisoteo de este afectando la resistencia a la penetración como muestra la Figura 6. Al respecto RAMÍREZ y SALAZAR (2006) mencionan que a medida que disminuye el contenido de materia orgánica, aumenta la resistencia a la penetración.

Los suelos de los sistemas de uso con coca y degradado, son los que obtuvieron los valores más bajos en materia orgánica con 1.76 y 1.39% respectivamente, según GASTEIZ (s. d.) el nivel de contenido de materia orgánica en estos sistemas son muy bajos, esto se ve reflejado con el contenido de biomasa total (Figura 10) y en el caso del sistema de uso con coca, se observa de manera general que usan herbicidas, siembran a favor a la pendiente, que causan la erosión y contaminación del suelo. Traduciéndose en una disminución del contenido de materia orgánica.

5.2.2 Respiración microbiana

Se observa claramente como disminuye la respiración microbiana a medida que hay intervención del hombre a usar los suelos en los diferentes

sistemas, desde el bosque hasta el suelo degradado. Este resultado nos muestra que el manejo intensivo del suelo altera sus propiedades y condiciones que repercuten en la actividad de los microorganismos y por consiguiente en la descomposición de la materia orgánica y en la dinámica de CO₂ (GARCÍA *et al.*, (2003).

Como ya se mencionó, el sistema de bosque presenta una respiración microbiana mayor que los demás sistemas y esto es debido a que los suelos de los bosques contienen alta materia orgánica en descomposición por la actividad microbiana y esto nos indica a que estos suelos son fértiles con buenas condiciones físicas y químicas y es así que, MORA, (s.d.) menciona que la estimación de la respiración del suelo da una idea de la dinámica de su biota y, por lo tanto, de los procesos metabólicos que en él se desarrollan; tales procesos varían en función de factores biofísicos y climáticos del suelo y del uso de la tierra, por lo cual su medición es un indicador de la actividad microbiana presente, pues una buena actividad microbiana puede ser el reflejo de óptimas condiciones físicas y químicas que permitan el desarrollo de los procesos metabólicos de bacterias, hongos, algas y actinomicetos y de su acción sobre los substratos orgánicos.

El sistema de uso con coca y degradado presentan los valores más bajos de respiración microbiana, posiblemente por el bajo contenido de materia orgánica (Figura 9), Otra explicación es al tipo de conducción del cultivo (monocultivo), en estas situaciones el sistema tiende a disminuir la producción de biomasa; al respecto estudios realizados por HERNÁNDEZ *et al.* (2008)

concluyeron que la producción microbiana de CO₂ disminuyó significativamente cuando el pino se introdujo como monocultivo, pero cuando el eucalipto fue usado en la reforestación, el suelo no mostró cambios en la actividad microbiana (CO₂).

5.2.3 Cantidad de macrofauna en los sistemas de uso del suelo

Observamos también que el sistema de uso del suelo más equiparado es el bosque, seguido del cacao y maizal. En el caso del sistema de uso con pasto y coca, éste último es el que presenta una mayor equidad, difiriendo de la diversidad donde el sistema pasto resultó ser mayor, indicando entonces que no hay una relación directa entre ambos índices, porque a pesar de que el sistema de uso con pasto pueda tener mayor cantidad de especies (Figura 12) y mayor diversidad (Figura 13) que el sistema de coca, éste tiene más equidad en cada especie.

5.3 De las relaciones entre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sistemas de uso del suelo

La resistencia a la penetración, inestabilidad estructural, materia orgánica, biomasa, respiración microbiana, índice de Shannon y el índice de equidad, son buenos indicadores de calidad. Esta afirmación obedece a la siguiente lógica, el suelo del sistema de uso con bosque son de mayor calidad que un suelo degradado, ésta última se ha alterado en sus propiedades físicas, químicas y biológicas alterando su calidad.

Asimismo en la siguiente se describe el modelo de las variables que tienen mayor relación entre las propiedades:

- a) Para el caso de la resistencia a la penetración, ésta se ve influenciada inversamente por el contenido de fósforo, la respiración microbiana y el índice de equidad.
- b) La inestabilidad estructural, se ve influenciada directamente por la resistencia a la penetración e inversamente al contenido de materia orgánica, la respiración microbiana y el índice de equidad.
- c) El contenido de materia orgánica, se ve influenciado directamente por el índice de Shannon e inversamente por la inestabilidad estructural, la respiración microbiana y el índice de equidad.
- d) El contenido de biomasa vegetal, se ve influenciado directamente por la respiración microbiana, el índice de Shannon e inversamente por el índice de equidad.
- e) La respiración microbiana, se ve influenciada directamente el índice de Shannon e inversamente por la inestabilidad estructural, el contenido de materia orgánica y el índice de equidad.
- f) El índice de Shannon, se ve influenciado directamente por el contenido de materia orgánica, contenido de biomasa vegetal, la respiración microbiana y el índice de equidad e inversamente por la resistencia a la penetración.
- g) El índice de equidad, se ve influenciado inversamente por la inestabilidad estructural y la respiración microbiana.

En todos los casos podemos ver que la respiración microbiana explica mejor las variables y en mayor cantidad, demostrando ser un buen indicador de calidad.

VI. CONCLUSIONES

1. Las variables estudiadas reflejaron cambios de calidad de suelo en la parte baja de la microcuenca del río Supte San Jorge, por los diferentes sistemas de uso que se están realizando.
2. Los sistemas de uso con bosque, cacao, plátano y pasto presentan una textura franco arcillosa, con maíz una textura franco y con coca junto al degradado una textura arcillosa.
3. El sistema con mayor valor de resistencia a la penetración fue el correspondiente al degradado (4.50 k/cm^2), seguido al de coca (4.22 k/cm^2) y pasto (4.17 k/cm^2), lo cual indica que la labranza intensiva, el pisoteo del ganado, la textura arcillosa y el bajo contenido de materia orgánica aumenta la resistencia a la penetración. En comparación con los otros sistemas de uso el de bosque (1.67 k/cm^2) conserva mejor sus propiedades físicas, seguido del maíz (2.22 k/cm^2), cacao (2.81 k/cm^2) y plátano (2.89 k/cm^2).
4. Los valores más desfavorables de inestabilidad estructural se produjeron en los sistemas degradado (66.36%) y coca (61.59%), seguido de los sistemas con pasto (58.54%), plátano (54.58%) y maíz (53.03%), caso

contrario ocurrió con los sistemas de bosque (52.83%) y cacao (49.32%) que fueron los más estables estructuralmente.

5. El sistema de uso con maíz presentó un mayor contenido de fósforo en el suelo de 11.18 ppm, debido a la aplicación de fertilizantes fosfóricos propios del sistema, le siguió el sistema con bosque (8.62 ppm), plátano (8.38 ppm) y cacao (8.01 ppm), todos ellos obteniendo un nivel medio de fósforo debido al alto contenido de materia orgánica que presentan; los sistemas de uso con pasto, coca y degradado con valores de 6.68, 6.17 y 5.40 ppm respectivamente resultaron tener un nivel bajo de fósforo en el suelo.
6. El sistema que presentó el nivel alto en materia orgánica fue el de uso con cacao (4.38%), los sistemas con bosque (3.88%), pasto (3.45%), maíz (3.25%) y plátano (2.69%) presentaron un nivel medio en materia orgánica, debido al contenido considerable de biomasa vegetal que al descomponerse se convierte en una fuente importante de materia orgánica, excepto en el caso del sistema de uso con pasto, ya que su contenido se debe al estiércol del ganado ovino y a la disminución de la tasa de transformación de la materia orgánica por las condiciones no propicias, causadas por el pisoteo. Para los sistemas de uso con coca y degradado el nivel de contenido de materia orgánica son muy bajos con un porcentaje de 1.76% y 1.39% respectivamente, esto debido a la cantidad baja de biomasa vegetal y a su alta resistencia a la penetración.

7. La respiración microbiana fue menor en los sistemas de uso con coca y degradado con 0.045 y 0.023 mg CO₂/100 g suelo respectivamente, debido a las condiciones no propicias para el desarrollo de éstas, como alta resistencia a la penetración e inestabilidad estructural, bajo contenido de fósforo en el suelo, así como también niveles muy bajos en materia orgánica, caso contrario pasó con el bosque que presentó la mayor respiración con 0.103 mg CO₂/100 g suelo, seguido del sistema con cacao, plátano, maíz y pasto con 0.071, 0.069, 0.062 y 0.054 mg CO₂/100 g suelo respectivamente, por presentar mejores condiciones.
8. Los sistemas que contienen mayor densidad de macro organismos son el de plátano y pasto con 2,416 y 2,224 individuos/m² respectivamente, seguido del bosque (1,344 individuos/m²), cacao (704 individuos/m²), maíz (224 individuos/m²) y coca (208 individuos/m²); en el sistema degradado no se encontró individuo alguno. En cuanto a la diversidad y equidad de especies el bosque presentó la mejor, seguido del cacao y maíz; el sistema de uso con pasto presentó una mayor diversidad que el de coca, pero éste obtuvo una mejor equidad entre especies.
9. En las condiciones estudiadas el indicador más sensible para evaluar la calidad del suelo, es la respiración microbiana.

VII. RECOMENDACIONES

1. Evaluar por mayor tiempo, a fin de obtener datos con mejores diferencias correspondientes a las propiedades físicas del suelo, donde indiquen la pérdida de la calidad del suelo en los diferentes cambios de uso de suelo.
2. Realizar estudios de esta naturaleza en otros sistemas de uso del suelo para obtener los valores críticos de los indicadores, y permita obtener tablas de calidad de suelo de la zona de Supte San Jorge.

SOIL QUALITY IN DIFFERENT SYSTEMS OF USE IN SUPTE SAN JORGE- TINGO MARÍA

VIII. ABSTRACT

The research was conducted at a farm located in the lower part of the watershed of the rio Supte, province of Leoncio Prado, Huánuco region; with the objective of evaluating if the different systems of land uses affect the quality of the soil in regard to the physical, chemical and biological properties. It has been extracted from soil samples from each system and its use of mathematics was carried out in the Laboratory of Soil and Water Conservation for the Universidad Nacional Agraria de la Selva, other samples were determined in situ; using for this purpose, a completely randomized design with three replicates per treatment. Evaluated seven systems of land use, still use systems with forest, cocoa, bananas and grass that have a clayey loam, with maize a loamy texture with coca and next to the degraded a clay texture. The system with higher value of resistance to the penetration was the degraded soil (4.50 k/cm^2). The values most unfavourable structural instability occurred in the degraded soil systems (66.36%). The system for use with corn presented a higher content of phosphorus in the soil of 11.18 ppm. System that presented a high level in organic matter was the use with cocoa (4.38%). Microbial respiration was lower in the systems of use with coca with $0.045 \text{ mg CO}_2/100 \text{ g soil}$. The system containing higher density macro organisms is banana with $2,416 \text{ individuals/m}^2$. In the studied conditions the most sensitive indicator to assess the quality of the soil, is microbial respiration.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, E., CARRASCO, M., LEÓN, O., MARTÍNEZ, E., SILVA, P., CASTILLO, G., AHUMADA, I., BORIE, G., GONZÁLES, S. 2005. Criterios de calidad de suelo agrícola. [En Línea]: SAG, (http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_suelos/1_portada_indice.pdf, 20 Dic. 2011).
- ACOSTA, Y., CAYAMA, J., GÓMEZ, E., REYES, N., ROJAS, D., GARCÍA, H. 2006. Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias. Venezuela*. 6(3):220-227.
- ÁLVAREZ, J., ANZUETO, M. 2004. Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los Altos de Chiapas, México. *Agrociencia. México*. 38(1):13-22.
- ARUANI, M., SÁNCHEZ, E., REEB, P. 2006. Cambios en las propiedades de un suelo franco bajo producción orgánica de manzano utilizando coberturas vegetales. *Ciencia del Suelo, Argentina*. 24(2):131-137.

- ARUANI, M., BEHMER, S. 2004. Efecto de la granulometría y la compactación del suelo sobre la distribución de raíces en manzano. Revista de Investigaciones Agropecuarias - RIA, Buenos Aires, Argentina. 33(2):43-54.
- BAUTISTA, A., ETCHEVERS, J., DEL CASTILLO, R., Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente, México. 13(2):90-97.
- CANO, A. s.d. Manual de Prácticas de la Materia de Edafología. Mexico - Chiapas. [En Línea]: UTSELVA, (<http://www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf>, 19 Nov. 2011).
- CALDERÓN, F. s.d. La estabilidad estructural del suelo. [En línea]: DRCALDERONLAB, (http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Estabilidad_Estructural_del_Suelo.htm, 07 Feb. 2012).
- CARRASCO, N., COSTA, J., ZAMORA, M. 2008. Argentina. Calidad física del suelo en el área Sur de la Cuenca del Arroyo Claromecó. [En línea]: DATA, (http://pe.data.toolbar.yahoo.com/bh/v1/epa/?nrd=1&sc=cclean&tc=&intl=pe&pc=cclean=404&url=http%3A%2F%2Fwww.mdp.edu.ar%2Fagarias%2Fposgrado%2Favances_carrasco.doc, 30 Oct. 2010).
- COTRINA, H. 2011. Costa Rica. Evaluación de la calidad del suelo y de la diversidad de su macrofauna en cacaotales y bosques de Bocas del

- Toro, Panamá. [En línea]: CATIE, (http://www.catie.ac.cr/BancoMedios/Documentos%20PDF/pcc_heidi_cotrino.pdf. documentos, 30 Oct. 2010).
- CROSARA, A. (s.d.). Textura del suelo. [En línea]: EDAFOLOGIA (<http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%203.pdf>, 11 Feb 2011).
- DUQUE, G., ESCOBAR, C. 2002. Mecánica de los Suelos; Consistencia y Plasticidad. [En línea]: GALEON, (<http://www.galeon.com/geomecanica/cap4.pdf>, 11 Feb. 2011).
- ECOPLEXITY, Teaching ecological complexity. 2010. Densidad aparente del suelo. [En línea]: PORTLAND STATE UNIVERSITY, (<http://ecoplexity.org/node/596>, 11 Feb. 2011).
- EDAFOLOGÍA. 2012. Textura del suelo. España [En línea]: EDAFOLOGIA, (<http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/text.htm>, 30 Oct. 2010)
- ESCARLATA. 2011. Suelos arcillosos, arenosos y francos: Identificación y Precauciones. [En línea]: BLOGJARDINERIA, (<http://blogjardineria.com/suelos-iv/>, 11 Feb. 2011)
- FERRERAS, L., MAGRA, G., BESSON P., KOVALEVSKI, E., GARCÍA, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. Ciencia del suelo, Buenos Aires. 25(2):159-172.

FERRERAS, L., TORESANI, S., BONEL, B., FERNÁNDEZ, E., BACIGALUPPO, S., FAGGIOLI, V., BELTRÁN, C. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*. Argentina. 27(1):103-114.

FLORES, L., ALCALÁ, J. s.d. *Manual de Procedimientos Analíticos*. México. [En Línea]: GEOLOGIA, (<http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/manualLFS.pdf>, 19 Nov. 2011).

GALEON. (s.d.). El maíz. [En línea]: AEIAGRO, (<http://aeiagro.galeon.com/aficiones1553013.html>, 12 Dic. 2011).

GARCÍA, C., GIL, F., HERNÁNDEZ, T., TRASAR, C. 2003. *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos: Medidas de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana; La respiración del suelo y su importancia como parámetro de la Calidad del mismo*. Ediciones Mundi-Prensa. 1 ed. Murcia, España, Tipografía San Francisco S.A. 373 p.

GASTEIZ, V. s.d. *Calidad del suelo. Metodología del modelo*. [En línea]: VITORIA, ([http://www.vitoria-gasteiz.org/w24/docs/ceac/siam/tabmetod/geoedafo/ caledaf.pdf](http://www.vitoria-gasteiz.org/w24/docs/ceac/siam/tabmetod/geoedafo/caledaf.pdf), 12 Ago. 2011).

- GÓMEZ, A., AZÓCAR, A. 2002. Áreas potenciales para el desarrollo del cultivo cacao en el Estado Mérida. *Agronomía Tropical*. Maracay. 52(4):112-220.
- HERNÁNDEZ, R., RAMIREZ, E., CASTRO, I., CANO, S. 2008. Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia*, México. 42(3): 253-266
- HENRÍQUEZ, C., ORTIZ, O., LARGAESPADA, K., PORTUGUÉZ, P. VARGAS, M., VILLALOBOS, P. GÓMEZ, D. 2011. Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, Costa Rica. 35(1):175-184.
- INFOJARDÍN. 2002. Textura del suelo. [En Línea]: ARTICULOS (http://articulos.infojardin.com/articulos/Textura_2.htm, 11 Ene. 2012).
- INGARAMO, O., Paz, A., Dugo, M. 2003. Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la península Ibérica. España. [En Línea]: INGARAMO, (<http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/05-Agrarias/A-032.pdf>, 12 Ene. 2012).
- ICTA.GOB. s.d. Recomendaciones para el cultivo del plátano [En línea]: ICTA, (http://www.icta.gob.gt/fpdf/recom_/frut_ls/cultivoplatano.PDF, 12 Dic. 2011).

IPNI (INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE). s.d. Importancia del fósforo en el suelo. Georgia. [En Línea]: IPNI, ([http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page](http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page), 23 Nov. 2011).

MARQUEZ, R. s.d. Análisis de Laboratorio. Estudio del suelo. Venezuela. [En Línea]: WEBDELPROFESOR (http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf, 23 Nov. 2011).

MARTINEZ, E., FUENTES, J., ACEVEDO, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Suelo Nutrición Vegetal. 8(1):68-96

MICUCCI, F. 2004. Aptitud física de suelos de Pampa Ondulada para ser manejados con Siembra Directa. Tesis Mag. Sc. Ciencia del suelo. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. 127 p.

MONTENEGRO, E. 2005. Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y convencional. Tesis Magíster Scientiae. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Escuela de Posgrado. 67p.

MORA, J. s.d. Colombia. La actividad microbiana: Un indicador integral de la calidad del suelo. [En línea]: UNIVERSIDAD DE CALDAS,

(http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=com_content&task=view&id=223&Itemid=223, 15 Oct. 2010).

NACCI, S., PLA SENTIS, I. 1992. Estudios de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país. *Agronomía Tropical*, Venezuela. 42(1-2):115-132.

NAVARRO, B. 1984. Temas de química agrícola del suelo y los elementos esenciales para la vida vegetal. 1 ed. Madrid, España, Academia S.A. 110p.

ORTIZ, I., FERNÁNDEZ, E., MARTÍN, F. 2008. Estimación de propiedades físicas del suelo en gabinete y su aplicación en la identificación de horizontes edáficos. [En línea]: RACO, (<http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewfile/120987/166502>, 10 Ene. 2011)

ONI (Olimpiadas Nacionales de contenidos educativos en internet). s.d. Argentina. El Suelo. [En línea]: ONI, (<http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi2000/santa-fe-sur/siembradirecta/proceso1.htm>, 14 Ene. 2012).

PAZ, I. 2007. Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Cauca, Colombia. Universidad del Cauca. 102 p.

- ÁPULIDO, M., LOBO, D, LOZANO, Z. 2009. Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia*, México. 43(3):221-230.
- RAMIREZ, R., TRUJILLO, P., RIVERA, B. s.d. COLOMBIA. Identificación y Cuantificación de la Actividad Microbiana, y Macrofauna de un Andisol bajo diferentes sistemas de manejo, en el Municipio de Marinilla (Antioquía). [En línea]: UNALMED, (http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/rramirez/identificacion_y_cuantificacion_de_la_actividad_microbiana,_y_macro_fauna_de_un_andisol_bajo_diferentes_sistemas_de_manejo,_en_el_municipio_de_marinilla__antioquia_.pdf, 12 Nov. 2011).
- RAMÍREZ, R., SALAZAR, C 2006. Cambios de la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un Andisol – Marinilla La Montañita. [En línea]: UNALMED, (http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/rramirez/cambios_de_la_resistencia_a_la_penetracion_en_un_suelo_con_diferentes_sistemas_de_manejo_y_su_relacion_con_algunas_propiedades_fisicas_en_un_andisol-marinilla_la_montanita.pdf, 07 Feb. 2012).
- RAMOS, N. 2003. Evaluación del fósforo extraído con dos soluciones extractoras en 19 suelos del Altiplano Occidental de Guatemala. Tesis In. Agrónomo. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. 51p.

- RODRIGUEZ, F. 1995. Iquitos, Perú. El recurso del suelo en la Amazonía peruana, diagnóstico para su investigación. [En Línea]: IIAP, (<http://www.aeet.org/ecosistemas/042/revision2.htm>, 05 Abr. 2010).
- ROMERO, L. 1996. Calibración de siete métodos de análisis de Fósforo disponible en Suelos del Alto Huallaga. Tesis Ing. Agrónomo. Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva. 80p.
- SADEGHIAN, S., RIVERA, J., GÓMEZ, M. s.d. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. [En Línea]: Conferencia electrónica de la FAO sobre Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica, (<http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/agrofor1/Siavosh6.htm>, 12 May. 2011).
- SANZANO, A. s.d. Química del suelo, el fósforo del suelo. Argentina. [En Línea]: EDAFO, (www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf, 23 Nov. 2011).
- SILVA, R. s.d. Materia orgánica: Su utilización en la evaluación de la calidad del suelo en distintos ambientes del sur de Santa Fé. [En Línea]: (http://www.eagronomico.com.ar/tus_imagenes/2015.pdf, 07 Nov. 2011).

- TERRAZAS, J. 2006. Manual de difusión técnica de soya. Bolivia. [En Línea]: PLANETASOJA, (<http://www.planetasoja.com/trabajos/trabajos800.php?id1=20761&publi=&idSec=31&id2=20769>, 19 Nov. 2011).
- USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del suelo; Densidad aparente. Trad. por Lutens Alberto. 1 ed. EE.UU, Washington, s.n. 82 p.
- VENIALGO, C., GUTIERREZ, C., GUTIERREZ, J. 2004. Variables edáficas en diferentes sistemas de uso del suelo en el sudoeste chaqueño. Argentina. [En Línea]: Comunicaciones científicas y Tecnológicas 2004, (<http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/5-Agrarias/A-074.pdf>, 19 Nov. 2011).
- WIKIPEDIA Enciclopedia libre. 2012. Morfología del suelo, porosidad. EE.UU. [En Línea]: WIKIPEDIA, (http://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_de_suelo, 10 Ene. 2012).
- ZERBINO, M. 2005. Evaluación de la densidad, biomasa y diversidad de la macrofauna del suelo en diferentes sistemas de producción. Tesis Magister Ciencias Ambientales. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. 92 p.

ANEXO

Anexo A. Resumen de los resultados de las diferentes evaluaciones.

Cuadro 20. Cuadro analítico de los resultados.

	Textura	R.p	I.e	MO	Biomasa	Fósforo	Respiración microbiana	Densidad	I. Shannon	I. Equidad
Bosque	FrAr	1.67	52.83	3.88	12.54	8.62	0.103	1,344	1.49	0.83
Cacao	FrAr	2.81	49.32	4.38	7.19	8.01	0.071	704	1.08	0.78
Plátano	FrAr	2.89	54.58	2.69	4.48	8.38	0.069	2,416	0.37	0.34
Maizal	Fr	2.22	53.03	3.25	0.89	11.18	0.062	224	0.52	0.75
Pasto	FrAr	4.17	58.54	3.45	3.30	6.68	0.054	2224	0.48	0.27
Coca	Ar	4.22	61.59	1.76	0.96	6.17	0.045	208	0.27	0.39
Degradado	Ar	4.50	66.36	1.39	0.55	5.40	0.023	0	0	0

Anexo B. Hojas de Evaluación

HOJA DE TRABAJO 1

Textura del suelo

Sistema de

uso :

Fecha

:

Evaluador :

SISTEMA	Repetición	Lectura 1	Lectura 2	% Ao	% Li	% Ar	Total
BOSQUE	1						
BOSQUE	2						
BOSQUE	3						
CACAO	1						
CACAO	2						
CACAO	3						
PLATANO	1						
PLATANO	2						
PLATANO	3						
MAIZ	1						
MAIZ	2						
MAIZ	3						
PASTO	1						
PASTO	2						
PASTO	3						
COCA	1						
COCA	2						
COCA	3						
DEGRADADO	1						
DEGRADADO	2						
DEGRADADO	3						

HOJA DE TRABAJO2

Resistencia del suelo a la penetración

Sistema de uso :

Fecha

Evaluador :

SISTEMA	Repetición	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Resistencia del suelo a la penetración (kg/cm ²)
BOSQUE	1				
BOSQUE	2				
BOSQUE	3				
CACAO	1				
CACAO	2				
CACAO	3				
PLATANO	1				
PLATANO	2				
PLATANO	3				
MAIZ	1				
MAIZ	2				
MAIZ	3				
PASTO	1				
PASTO	2				
PASTO	3				
COCA	1				
COCA	2				
COCA	3				
DEGRADADO	1				
DEGRADADO	2				
DEGRADADO	3				

HOJA DE TRABAJO3

Inestabilidad estructural del suelo

Sistema de uso :

Fecha : Evaluador :

SISTEMA	Repetición	volumen en ml al agua	volumen en ml en KCL	inestabilidad estructural (diferencia de volúmenes)	Inestabilidad estructural en %
BOSQUE	1				
BOSQUE	2				
BOSQUE	3				
CACAO	1				
CACAO	2				
CACAO	3				
PLATANO	1				
PLATANO	2				
PLATANO	3				
MAIZAL	1				
MAIZAL	2				
MAIZAL	3				
PASTO	1				
PASTO	2				
PASTO	3				
COCA	1				
COCA	2				
COCA	3				
DEGRADADO	1				
DEGRADADO	2				
DEGRADADO	3				

HOJA DE TRABAJO4

Fósforo en el suelo

Sistema de uso :

Fecha :

Evaluador :

SISTEMA	Repetición	Fosforo en ppm
BOSQUE	1	
BOSQUE	2	
BOSQUE	3	
CACAO	1	
CACAO	2	
CACAO	3	
PLATANO	1	
PLATANO	2	
PLATANO	3	
MAIZAL	1	
MAIZAL	2	
MAIZAL	3	
PASTO	1	
PASTO	2	
PASTO	3	
COCA	1	
COCA	2	
COCA	3	
DEGRADADO	1	
DEGRADADO	2	
DEGRADADO	3	

HOJA DE TRABAJO5

Materia orgánica del suelo

Sistema de uso :

Fecha :

Evaluador :

SISTEMA	Repetición	Peso de muestra (g)	Gasto en ml de sal de mohr (titulación)	% de MO
BOSQUE	1			
BOSQUE	2			
BOSQUE	3			
CACAO	1			
CACAO	2			
CACAO	3			
PLATANO	1			
PLATANO	2			
PLATANO	3			
MAIZAL	1			
MAIZAL	2			
MAIZAL	3			
PASTO	1			
PASTO	2			
PASTO	3			
COCA	1			
COCA	2			
COCA	3			
DEGRADADO	1			
DEGRADADO	2			
DEGRADADO	3			
BLANCO				

Anexo C. Fotografías del trabajo de investigación.



Figura 14. Sistema de uso Bosque



Figura15. Sistema de uso con cacao



Figura16. Sistema de uso con plátano



Figura17. Sistema de uso con maíz



Figura 18. Sistema de uso con pasto



Figura 19. Sistema de uso con coca



Figura 20. Suelo degradado



Figura 21. Determinación de la resistencia a la penetración del suelo



Figura 22. Evaluación de la fauna del suelo



Figura 23. Determinación de la respiración microbiana del suelo



Figura 24. Determinación de la inestabilidad estructural

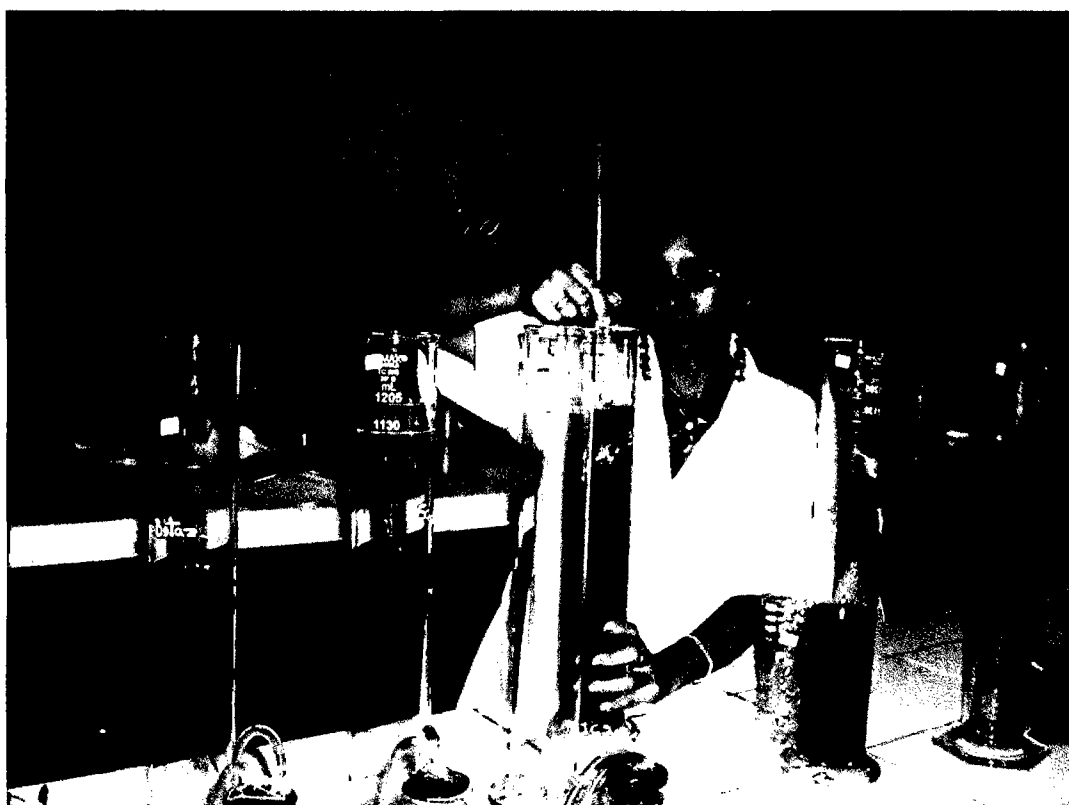


Figura 25. Determinación de la textura del suelo



Figura 26. Determinación del fósforo del suelo

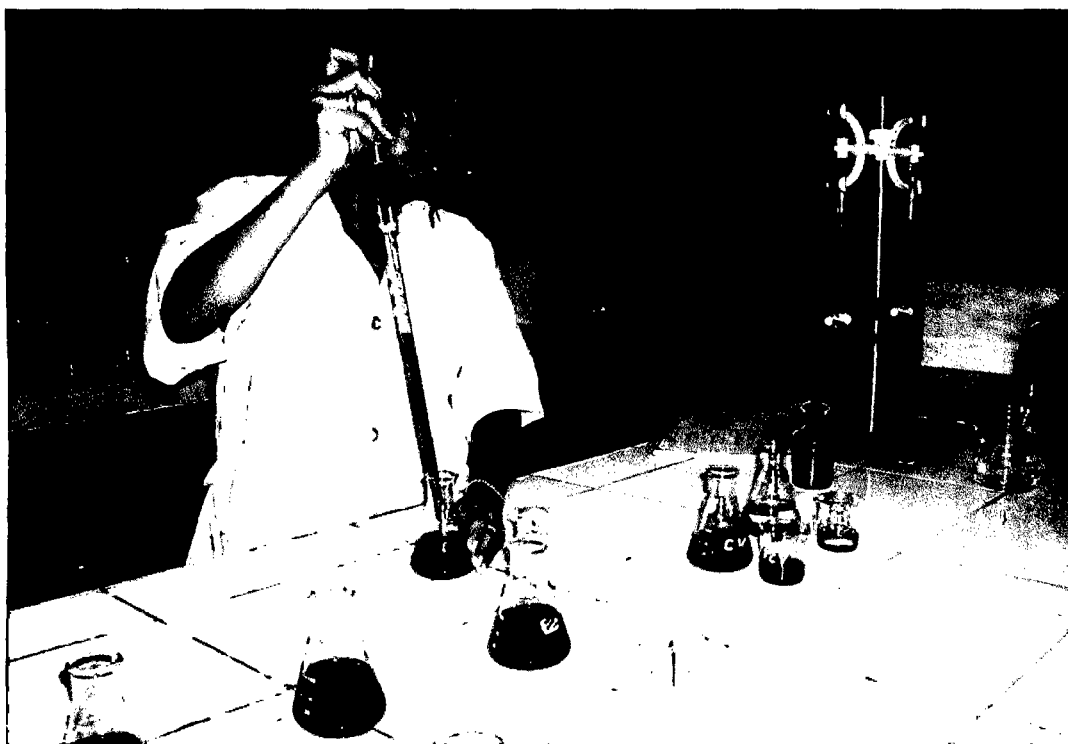


Figura 27. Determinación de la materia orgánica