

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**“PROPIEDADES QUÍMICAS Y CARBONO ORGÁNICO  
ALMACENADO EN EL SUELO DE TRES SISTEMAS DE USO  
DE LA TIERRA - DISTRITO NUEVO PROGRESO, REGIÓN  
SAN MARTÍN”**

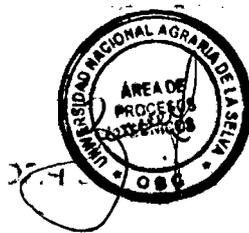
**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES  
MENCION MENCION CONSERVACION DE SUELOS Y  
AGUA**

**Presentado por:**

**JIMMY JHONATAN NIETO MONTECILLO**

**2015**



**T**

**CSA**

**Nieto Montecillo, Jimmy Jhonatan**

“Propiedades químicas y carbono orgánico almacenado en el suelo de tres sistemas de uso de la tierra – Distrito Nuevo Progreso, Región San Martín”

86 páginas; 14 cuadros; 30 figuras; 80 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.

- |                                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| <b>1. PROPIEDADES QUÍMICAS</b> | <b>2. SUELOS</b>            |
| <b>3. CARBONO ORGÁNICO</b>     | <b>4. USOS DE LA TIERRA</b> |



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Tingo María – Perú



**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

## **ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

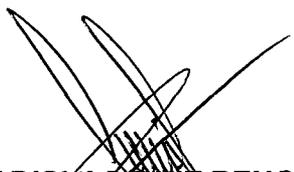
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 25 de noviembre del 2015, a horas 5:00 p.m. en la Sala de Sesiones del Departamento Académico de Ciencias en Conservación de Suelos y Agua, para calificar la Tesis titulada:

### **“PROPIEDADES QUÍMICAS Y CARBÓN ORGANICO ALMACENADO EN EL SUELO DE TRES SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA – DISTRITO NUEVO PROGRESO, REGIÓN SAN MARTÍN”**

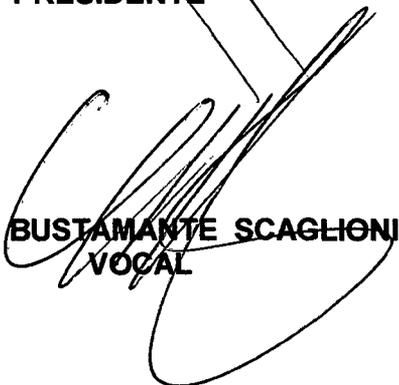
Presentado por el Bachiller: **JIMMY JHONATAN NIETO MONTECILLO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto 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, 07 de diciembre del 2015.

  
Ing. M.Sc. **LADISLAO RUIZ RENGIFO**  
**PRESIDENTE**

  
Ing. M.Sc. **LUIS A. VALDIVIA ESPINOZA**  
**VOCAL**

  
Ing. **ERLE BUSTAMANTE SCAGLIONI**  
**VOCAL**

  
Ing. M.Sc. **JOSÉ D. LÉVANO CRISÓSTOMO**  
**ASESOR**

## DEDICATORIA

*A Dios; porque está conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar.*

*A mis padres Teófilo Nieto Solis y Evelina Flora Montecillo Santivañez; pilares fundamentales en mi vida, quienes siempre han velado por mi bienestar y educación, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy. Los amo con mi vida.*

*A mi esposa Juana Rosas Ruiz; compañera inseparable de cada jornada, por constituir mi fortaleza e impulso en momentos difíciles y darme ese pedacito de cielo, nuestro hijo Teo Gael Nieto Rosas. A ellos con amor por ser mi inspiración.*

*A Milagros Nieto Montecillo; mi hermana, por su apoyo y los hermosos momentos vividos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

- A Dios Todopoderoso, por haberme guiado por el camino del bien y la felicidad.
- A cada uno de los integrantes de mi familia, en especial a mi padre Teófilo Nieto Solis y mi madre Evelina Flora Montecillo Santivañez, por su abnegado sacrificio y apoyo incondicional.
- A mi asesor de tesis, Ing. M. Sc. José D. Lévano Crisóstomo, por su dedicación y oportunas sugerencias durante el desarrollo de la investigación.
- A mis profesores, a quienes les debo gran parte de mis conocimientos; gracias a su paciencia y enseñanzas.
- A la prestigiosa Universidad Nacional Agraria de la Selva, mi Alma Mater; la cual me abrió sus puertas preparándome para un futuro competitivo, con principios y valores.
- A mis compañeros de estudio, en particular a Carlos Felipe Sanchez Tuesta, por los hermosos momentos vividos en lo favorable y en las adversidades, porque en esta armonía grupal hemos logrado cumplir el anhelo de ser profesionales.
- A todas aquellas personas que de alguna forma son parte de la culminación del presente estudio.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	01
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	03
2.1. El efecto invernadero.....	03
2.2. EL dióxido de carbono.....	04
2.2.1. Fuentes de CO <sub>2</sub> .....	06
2.2.2. Sumideros de CO <sub>2</sub> .....	06
2.3. Importancia de los sistemas agroforestales (SAF) en el almacenamiento de carbono.....	09
2.4. Carbono y materia orgánica en el suelo.....	11
2.4.1. El papel fundamental de la materia orgánica en los suelos...	13
2.4.2. Almacenamiento de carbono en el suelo.....	13
2.4.3. Estimación del almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS).....	14
2.5. Los sistemas de producción de café.....	17
2.5.1. Sistema rústico.....	18
2.5.2. Sistema policultivo tradicional.....	18
2.5.3. Sistema policultivo comercial.....	19

2.5.4. Monocultivo bajo sombra especializada.....	19
2.5.5. Monocultivo bajo sol.....	19
2.6. Antecedentes de la investigación.....	20
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
3.1. Lugar de ejecución.....	23
3.1.1. Ubicación política.....	23
3.1.2. Ubicación geográfica (coordenadas UTM).....	23
3.2. Descripción de los sistemas de uso de la tierra en estudio.....	24
3.2.1. Café bajo sombra de guaba (CBS).....	24
3.2.2. Café sin sombra (CSS).....	25
3.2.3. Silvopastoril (SSP).....	25
3.3. Clima.....	25
3.4. Hidrografía y unidades hidrográficas.....	26
3.5. Materiales y equipos.....	26
3.6. Metodología.....	27
3.6.1. Selección de las parcelas experimentales.....	27
3.6.2. Delimitación de las parcelas de los sistemas de uso de la tierra.....	27

3.6.3. Recopilación de datos de campo.....	28
3.6.4. Estimación del carbono orgánico del suelo.....	30
3.7. Tipo de investigación.....	31
3.7.1. Unidades exploratorias (UE).....	31
3.7.2. Variables independientes.....	31
3.7.3. Variables dependientes.....	32
3.8. Análisis estadístico.....	32
3.8.1. Modelo estadístico.....	34
IV. RESULTADOS.....	36
4.1. Propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra: café ( <i>Coffea arabica</i> L.) bajo sombra de guaba ( <i>Inga edulis</i> Mart.), café ( <i>Coffea arabica</i> L.) sin sombra y sistema silvopastoril.....	36
4.1.1. Propiedades descriptivas.....	36
4.1.2. Inferencias estadísticas.....	39
4.2. Carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres sistemas de uso de la tierra: café ( <i>Coffea arabica</i> L.) bajo sombra de guaba ( <i>Inga edulis</i> Mart.), café ( <i>Coffea arabica</i> L.) sin sombra y sistema silvopastoril.....	50

4.3. Correlación entre las propiedades químicas y la concentración de carbono orgánico del suelo (COS), en tres sistemas de uso de la tierra.....	54
V. DISCUSIÓN.....	59
5.1. Propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra: café ( <i>Coffea arabica</i> L.) bajo sombra de guaba ( <i>Inga edulis</i> Mart.), café ( <i>Coffea arabica</i> L.) sin sombra y sistema silvopastoril.....	59
5.2. Carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres sistemas de uso de la tierra: café ( <i>Coffea arabica</i> L.) bajo sombra de guaba ( <i>Inga edulis</i> Mart.), café ( <i>Coffea arabica</i> L.) sin sombra y sistema silvopastoril.....	63
5.3. Correlación entre las propiedades químicas y la concentración de carbono orgánico del suelo (COS), en tres sistemas de uso de la tierra.....	67
VI. CONCLUSIONES.....	70
VII. RECOMENDACIONES.....	72
VIII. ABSTRACT.....	73
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXO.....	86

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Coordenadas UTM de los sistemas de uso de la tierra.....	24
2. Tratamientos del experimento factorial.....	33
3. Análisis de variancia del experimento factorial.....	35
4. Propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra.....	37
5. Análisis de varianza para las propiedades químicas del suelo a un nivel de significancia del 5%.....	40
6. Prueba de promedios para los valores de pH y N sobre los efectos principales (SUT y E) (Promedio $\pm$ error estándar).....	42
7. Análisis del efecto simple para el contenido de MO entre el sistema de uso de la tierra (SUT) y los estratos o profundidades del suelo (promedio $\pm$ error estándar).....	45
8. Análisis del efecto simple de los estratos en cada sistema de uso de la tierra como influencia en el contenido de MO (promedio $\pm$ error estándar).....	47
9. Análisis de varianza para la densidad aparente del suelo (Dap).....	50
10. Análisis de los sistemas de uso de la tierra (SUT) en cada estrato de estudio con respecto al COS (promedio $\pm$ error estándar).....	51

11. Análisis de varianza de los sistemas de uso de la tierra con respecto al contenido de carbono orgánico del suelo.....	52
12. Carbono orgánico del suelo (COS) en tres sistemas de uso de la tierra (SUT) (promedio $\pm$ error estándar).....	53
13. Análisis de correlación de Pearson entre las propiedades químicas y el COS.....	55
14. Estadística descriptiva.....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama de muestreo de suelos para el análisis de la concentración de carbono y propiedades químicas del suelo de cada uno de los sistemas de uso de la tierra.....	28
2. Metodología propuesta por Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) (ANDERSON e INGRAM, 1993).....	29
3. Gráficos de box plot para los elementos químicos analizados en tres sistemas de uso de la tierra.....	38
4. pH y concentración de N en tres sistemas de uso de la tierra.....	42
5. pH y concentración de N en tres estratos o profundidades del suelo.....	43
6. Valores de pH en los tratamientos en estudio.....	44
7. Contenido promedio de N en los tratamientos en estudio.....	44
8. Contenido de MO de acuerdo a los sistemas de uso de la tierra evaluados en tres estratos o profundidades del suelo.....	46
9. Contenido de MO de acuerdo a cada estrato dentro de cada sistema de uso de la tierra.....	48
10. Contenido promedio de P y K <sub>2</sub> O en los tratamientos en estudio.....	49
11. Contenido de carbono orgánico del suelo en tres sistemas de	

uso de la tierra, evaluados en tres estratos o profundidades del suelo.....	52
12. Carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres sistemas de uso de la tierra (SUT).....	54
13. Regresión lineal del COS en el sistema CBS, actuando como regresora la MO.....	56
14. Regresión lineal del COS en el sistema CSS, actuando como regresora la MO.....	57
15. Regresión lineal del COS en el sistema SSP, actuando como regresora la MO.....	57
16. Regresión lineal del COS en el sistema SSP, actuando como regresora el K <sub>2</sub> O.....	58
17. Mapa de ubicación geográfica del predio.....	90
18. Mapa de ubicación de las parcelas de muestreo.....	91
19. Sistema bajo sombra de guaba <sub>1</sub> (CBS).....	92
20. Sistema bajo sombra de guaba <sub>2</sub> (CBS).....	92
21. Sistema café sin sombra <sub>1</sub> (CSS).....	93
22. Sistema café sin sombra <sub>2</sub> (CSS).....	93
23. Sistema silvopastoril <sub>1</sub> (SSP).....	94

24.	Sistema silvopastoril <sub>2</sub> (SSP).....	94
25.	Muestreo del suelo del sistema CBS.....	95
26.	Muestras de suelo del sistema CBS para determinación del COS.....	95
27.	Muestreo del suelo del sistema CSS.....	96
28.	Muestras de suelo del sistema CSS para determinación del COS.....	96
29.	Muestreo del suelo del sistema SSP.....	97
30.	Muestras de suelo del sistema SSP para determinación del COS.....	97

## RESUMEN

El CO<sub>2</sub> es el gas que más contribuye al calentamiento global, constituyendo el cambio de uso de la tierra la actividad con mayor emisión. Por consiguiente, los objetivos de la investigación fueron: determinar las propiedades químicas y el carbono orgánico almacenado en el suelo de tres sistemas de uso de la tierra: café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.), café sin sombra, y sistema silvopastoril; así mismo, encontrar la correlación entre las propiedades químicas y la concentración de carbono orgánico en el suelo (COS). Los tres sistemas de uso de la tierra (SUT) se localizan en el sector Víctor Andrés Belaúnde, distrito Nuevo Progreso, provincia Tocache, región San Martín. El muestreo de suelos se realizó empleando la metodología recomendada por Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), y la estimación del COS en cada estrato se realizó con la fórmula sugerida por MACDICKEN (1997). Se aplicó el Diseño Completamente al Azar con arreglo factorial 3A x 3B y seis repeticiones; los factores en estudio fueron: factor A: sistemas de uso de la tierra (CBS, CSS y SSP) y factor B: estrato o profundidad del suelo (0-10, 10-20 y 20-30 cm), con nueve tratamientos. Los resultados evidencian que el sistema CBS presenta pH moderadamente ácido (5.51), nivel medio de materia orgánica (MO) con 3.20%, nivel medio de nitrógeno (N) con 0.15%, nivel medio de fósforo (P) con 12.27 ppm y nivel alto de K<sub>2</sub>O (400.31 kg/ha); el sistema CSS muestra pH fuertemente ácido (5.33), nivel medio de MO (2.66%), nivel medio de N (0.12%), nivel medio de P (12.65 ppm) y nivel alto de K<sub>2</sub>O (362.65 kg/ha); el sistema SSP presenta pH fuertemente ácido (4.75), nivel bajo de MO (1.57%), nivel bajo de N (0.09%), nivel medio de P (8.51 ppm) y nivel alto de K<sub>2</sub>O

(297.03 kg/ha). Los sistemas CBS y CSS obtuvieron mayor concentración de COS (81.30 y 71.53 t C/ha, respectivamente) estadísticamente diferenciados del sistema SSP que obtuvo menor contenido de COS (40.42 t C/ha). En el sistema CBS existe una alta correlación del COS con la MO y el N (0.96 y 0.95, respectivamente); en el sistema CSS se repite el comportamiento anterior (0.99 para ambas propiedades); mientras en el sistema SSP la MO presenta una alta correlación (0.82), obteniendo el K<sub>2</sub>O solo en este sistema, correlación con el COS (0.55).

## I. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas que más contribuye al calentamiento global. Al respecto, FAO (2007) sostiene que el cambio de uso de la tierra ha sido y es una de las principales causas que contribuye a la emisión de gases efecto invernadero. Indica además, que la expansión agropecuaria de América Latina ha ejercido una presión creciente sobre los recursos naturales y el medio ambiente. Actualmente, la producción agrícola se enfrenta a una fuerte presión por una demanda creciente de alimentos a nivel mundial. El CO<sub>2</sub> es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de permanencia del gas en la atmósfera. Por su parte, JOBBÁGY y JACKSON (2000), afirman que el CO<sub>2</sub> es responsable del 50 % del calentamiento global debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra.

El sector Víctor Andrés Belaunde localizado en Tocache no es ajeno a esta alarmante problemática, dado que se evidencia la deforestación, quema y el cambio de uso de tierras, observándose de manera particular en la parcela en estudio, la transición de agricultura migratoria a sistema silvopastoril y cultivo de café, lo cual permite inferenciar que los suelos presentan diferencias en sus propiedades químicas y carbono orgánico almacenado.

Ante tal situación, es necesario encontrar estrategias productivas, ecológicas y económicamente sustentables para el manejo de los sistemas

agropecuarios. Una alternativa a los problemas de degradación de los recursos naturales por cambios de uso de suelo es la implementación de sistemas agroforestales (SAF), cuyo propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción para un manejo sostenible (SCHROTH *et al.*, 2001). Además, ofrecen múltiples servicios ecosistémicos como la captura de dióxido de carbono, principal gas causante del efecto invernadero (IBRAHIM *et al.*, 2007).

Por consiguiente, una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa (mediante la fotosíntesis) y en el suelo (a través de la acumulación de materia orgánica). Los sistemas agroforestales (SAF) representan sumideros importantes de carbono (C); sin embargo, es mínima la información cuantificada sobre su potencial de almacenamiento y fijación de C. (GALLOWAY y BEER 1997).

Por lo anteriormente expuesto, se plantea la presente investigación con la que se pretende cuantificar el carbono orgánico almacenado en el suelo de tres sistemas de uso de la tierra. Se propone por tanto, la hipótesis: “los diferentes tipos de uso de la tierra influyen en diferente grado sobre el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo y las propiedades químicas”.

#### Objetivos:

- Determinar las propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra: café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.), café (*Coffea arabica* L.) sin sombra y sistema silvopastoril.
- Determinar el carbono orgánico almacenado en el suelo de los tres sistemas de uso de la tierra.
- Encontrar la correlación entre las propiedades químicas y la concentración de carbono orgánico en el suelo.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. El efecto invernadero

Este es un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta, producido por ciertos gases que están presentes en la atmósfera, y que son los responsables de mantener el planeta a una temperatura apta para la vida. Los principales gases son el vapor de agua y el gas carbónico, el cual es el más importante debido a que es afectado por las actividades antropogénicas (RAMÍREZ, 1997). Los gases de invernadero bloquean la radiación terrestre infrarroja, impidiendo que escape directamente de la tierra hacia el espacio. La radiación infrarroja absorbida por la atmósfera es emitida de nuevo en parte hacia la tierra y en parte hacia el espacio, por lo tanto, mucha de la energía que la tierra emite es reflejada por la atmósfera y es devuelta hacia la tierra. La temperatura media de la tierra es de 15,5 °C debido al efecto invernadero; si este proceso no se llevara a cabo, la temperatura media global sería de -18 °C, por lo que no existirían condiciones aptas para la vida.

Los principales gases, en su mayoría producto de la actividad humana, que contribuyen a la amplificación del efecto invernadero son: el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), los óxidos nitrosos (N<sub>2</sub>O), los cloro-fluoro-carbonados (CFC'S), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>)

(ANDRASKO, 1990; CENTENO, 1992; MARENA, 1995; PNUD, 1997). Altas concentraciones de estos gases en la atmósfera absorben más calor, aumentando así la temperatura de la superficie. Las consecuencias pueden llegar lejos: cambio en la precipitación, en el número de días libres de heladas, en la frecuencia y severidad de las tormentas, en el comportamiento y distribución de plantas y animales y en los procesos de formación del suelo. Existe además, la posibilidad de que el nivel de los océanos se incremente al derretirse los casquetes polares (CIESLA, 1995). Los efectos del cambio climático podrían tener serias complicaciones en el futuro para la agricultura, la forestería y la pesca como resultado de alterar los ciclos biogeoquímicos y de la constante pérdida de la biodiversidad (VITOUSEK, 1994). Por su parte, RAMÍREZ (1997) asegura que de no darse un cambio, para el año 2100 se tendrá un incremento de la temperatura del orden de 4.5 °C, el cual haría que la mayor parte de las especies vivas no pudieran adaptarse al cambio climático.

## **2.2. EL dióxido de carbono**

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas antropogénico de efecto invernadero más importante. La concentración atmosférica global de CO<sub>2</sub> ha aumentado de un valor preindustrial de 280 ppm a 379 ppm. La tasa de crecimiento anual de la concentración de CO<sub>2</sub> fue más grande durante los años 1995-2005, con un promedio de 1.9 ppm por año (IPCC, 2007).

Cantidades enormes de CO<sub>2</sub> entran cada año a la atmósfera como consecuencia del uso generalizado de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural). Debido al constante intercambio de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y el

océano (el cual puede absorber una gran parte de CO<sub>2</sub>), solamente parte del CO<sub>2</sub> antropogénico permanece en la atmósfera. Sin embargo, no hay duda alguna de que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha estado aumentando de año en año (FERNÁNDEZ, 1991).

En la naturaleza el carbono se halla por doquier; según BRACK y MENDIOLA (2000), el carbono está presente en el aire, en el agua y en el suelo en forma de un gas llamado dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Se conoce asimismo, que el dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero más importante emitido como consecuencia de actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Según la ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (2013), la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera a escala mundial alcanzó 393.1 partes por millón en el año 2012, es decir, un 141% del nivel preindustrial de 278 partes por millón.

Según la misma fuente, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera aumentó en 2.2 partes por millón de 2011 a 2012, una cifra superior a la media de 2.02 partes por millón de aumento anual de los últimos 10 años, lo cual refleja la tendencia a una aceleración. Se infiere entonces, que a las tasas actuales de crecimiento, la concentración media mundial de CO<sub>2</sub> superará las 400 partes por millón en el 2015 o 2016.

Respecto a la temperatura media de la atmósfera terrestre, BRACK y MENDIOLA (2000) sostienen que se ha incrementado en medio grado centígrado en los últimos treinta años debido al llamado "efecto invernadero" ocasionado por el aumento en el contenido de gases el CO<sub>2</sub>, el metano, el óxido nitroso, clorofluorocarburos, que capturan el calor que irradia la superficie

terrestre. Desde la década de 1950 son crecientes las cantidades de gases de invernadero que se emiten hacia la atmósfera, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles, el uso de clorofluorocarbonatos, la agricultura y la deforestación.

### **2.2.1. Fuentes de CO<sub>2</sub>**

Antes del comienzo de la revolución industrial (hacia 1750, cuando el escocés James Watt perfeccionó las máquinas de vapor), la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera era de unas 280 ppm (0.028%) y ahora alcanza aproximadamente las 390 ppm (0.039%). Aunque la mayor parte de este incremento es atribuible a la quema de combustibles fósiles para generar electricidad, y de la industria y del transporte, se calcula que nada menos que un 35 % del aumento en los últimos 300 años ha sido debido a los cambios de usos del suelo impuestos por la agricultura (FOLEY, 2005).

Entre 1850 y 1998 se han emitido a la atmósfera, como consecuencia del quemado de combustibles de origen fósil y de la producción de cementos, aproximadamente 270 (+30) Gg C en forma de CO<sub>2</sub>. Como consecuencia del cambio de uso de la tierra predominantemente de los ecosistemas forestales, se han emitido unas 136 (+55) Gg C, lo cual a llevada a un aumento del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de 176 (+10) Gg C (IPCC, 2005).

### **2.2.2. Sumideros de CO<sub>2</sub>**

En la actualidad, el carbono en la atmósfera aumenta en promedio unos 3 Pg C al año. Sin embargo, las emisiones antrópicas de carbono

superan los 6 Pg C. Por lo tanto, ni siquiera la mitad del carbono emitido es retenido en la atmósfera (RAITSOS, 2005). Existen todavía muchas dudas sobre la localización de los sumideros actuales y en qué proporción se produce el reparto entre los océanos y la vegetación de esa emisión de carbono que no se queda en la atmósfera (BATTLE, 2000). Probablemente los océanos acumulan unas tres veces más CO<sub>2</sub> que los continentes.

SABINE (2004) encontró que de 244 Pg C emitidos por la quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento entre los años 1800 y 1994, 118 Pg C fueron absorbidos por los océanos y 106 Pg C fueron incorporados a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>. En los continentes, hubo una emisión neta de unos 24 Pg C, que resulta de restar lo absorbido por el sumidero de la biomasa terrestre a lo emitido por los cambios de uso del suelo. Sin embargo, en el período 1980-1999, los análisis mostraron que de los 117 Pg C emitidos por los combustibles fósiles y el cemento, 65 Pg C fueron incorporados a la atmósfera, 37 Pg C fueron absorbidos por los océanos, y 15 Pg C fueron absorbidos por la superficie continental.

El porcentaje del carbono emitido que se queda en la atmósfera está disminuyendo. Por ejemplo, en la década de los 70, el porcentaje de CO<sub>2</sub> antrópico que se quedaba en la atmósfera era el 70% del emitido, pero en la década de los 90 fue inferior al 50%. Una incógnita muy importante para calcular el incremento futuro del CO<sub>2</sub> atmosférico es saber si este porcentaje continuará disminuyendo y a qué ritmo (SCHIMEL *et al.*, 2001).

La diferencia creciente entre las emisiones antrópicas y el incremento atmosférico es debido al aumento de la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido

por los océanos, la vegetación y los suelos (JOOS, 1999 y 2003). Los cálculos se basan en los cambios registrados en la concentración atmosférica y oceánica de  $O_2$ , y en los gradientes latitudinales observados en las mediciones, tanto de  $CO_2$  como de  $O_2$  (KEELING, 1996).

Una prueba del incremento de la biomasa terrestre se fundamenta en la curva de evolución del  $CO_2$  atmosférico. En los últimos 30 años la amplitud del ciclo anual de la concentración de  $CO_2$  atmosférico ha aumentado, aunque de forma irregular. Esto es probablemente una consecuencia de una mayor actividad vegetativa, que implica una mayor absorción terrestre en primavera-verano (por incremento de la fotosíntesis global) y una mayor liberación de  $CO_2$  en otoño-invierno por incremento de la materia orgánica oxidada (KAUFMANN, 2004).

Respecto a los ecosistemas terrestres, se sabe que los del hemisferio norte absorben más  $CO_2$  atmosférico neto que los del hemisferio sur. El aire troposférico en el hemisferio norte contiene solamente unas 3 ppm de  $CO_2$  más que el aire del hemisferio sur, pero la mayor parte del  $CO_2$  es emitido en ese hemisferio, lo que debería ocasionar una diferencia superior de unas 4 o 5 ppm. El importante sumidero de la vegetación continental existente en el hemisferio norte podría explicar la anomalía. En este sentido, algunos cálculos indican que en el territorio de los Estados Unidos y de Canadá el  $CO_2$  absorbido por el suelo y la vegetación es superior incluso a las emisiones antrópicas de este gas en esos países (SCHIMMEL *et al.*, 2001). Otros cálculos más conservadores indican que la masa de  $CO_2$  absorbida por el territorio estadounidense es la tercera parte de la emitida: 0.5

Pg de carbono absorbido frente a 1.5 Pg de carbono emitido. Los cálculos para Europa indican que la biomasa absorbe entre el 7 y el 12 % de las emisiones (JANSSENS, 2003).

### **2.3. Importancia de los sistemas agroforestales (SAF) en el almacenamiento de carbono**

Los SAF pueden, en diversos grados, mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos. De hecho, la agroforestería incentiva prácticas sostenibles que utiliza insumos orgánicos de la finca que mejoran la calidad de los suelos y contribuyen a un mejor desarrollo de la planta, aumento de materia orgánica y el ciclaje de nutrientes, lo cual contribuye a almacenar bancos de carbono que son estables por décadas o siglos (KURSTEN y BURSCHEL, 1993).

En sistemas agroforestales, el componente más importante de la biomasa arriba del suelo es la biomasa de los árboles. ANACAFÉ (1998) encontró que en promedio el carbono almacenado en el sistema cafetalero fue 93 Mg C ha<sup>-1</sup>, distribuidos en 61, 23, 6, 3, C ha<sup>-1</sup> para el carbono orgánico del suelo (0-30 cm), de la biomasa arriba del suelo, de la hojarasca y de la biomasa abajo del suelo, respectivamente. Se concluyó al comparar con los resultados de carbono en tierras degradadas y cultivos anuales, que el carbono adicional fijado por el sistema cafetalero respecto a estos usos del suelo se encuentra en los árboles que conforman la sombra del sistema agroforestal café-árboles. Por su parte, FOURNIER (1996) presenta valores de fijación de carbono en bosque pluvial, bosque estacional y cafetales sin sombra, los cuales son 263, 205 y 77 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

El carbono almacenado directamente por los árboles dentro de los diferentes SAF oscila normalmente de 3 a 25 Mg C ha<sup>-1</sup>; en el caso de huertos caseros y taungya se logra superar los 50 Mg C ha<sup>-1</sup> (KURSTEN y BURSCHEL, 1993). El potencial para el almacenamiento de carbono en SAF, incluyendo el carbono del suelo, oscila entre 12 y 228 Mg C ha<sup>-1</sup> (DIXON, 1995), siendo el potencial para el almacenamiento de carbono mayor en el trópico húmedo.

El almacenamiento de CO<sub>2</sub> depende de la especie arbórea y densidad de siembra, la materia orgánica presente en el suelo, edad de los componentes, tipo de suelos, características del sitio, factores climáticos y del manejo silvicultural al que se vea sometido (CUBERO y ROJAS, 1999; SEGURA, 1999).

PANDEY (2002) por su parte, sugiere que un sistema agroforestal crea una interacción sinérgica entre los cultivos y los árboles para sostener la productividad, mientras que al mismo tiempo el carbono es secuestrado. Los sistemas agroforestales tienen dos beneficios principales para conservar carbono (DIXON, 1995; PANDEY, 2002):

1. Almacenaje directo de C a corto y mediano plazo (décadas y hasta siglos) en los árboles y en el suelo.

2. Reducción indirecta de la emisión de los gases de efecto invernadero causada por la deforestación y la agricultura migratoria.

En los sistemas agroforestales, el secuestro de carbono es un proceso dinámico y se puede dividir en fases: cuando se establecen muchos

sistemas probablemente son fuentes de gases de efecto invernadero (pérdida de carbono y nitrógeno de la vegetación y del suelo). Luego sigue una fase rápida de acumulación y período de maduración cuando el carbono es almacenado en los troncos, raíces y en el suelo y al final del periodo de rotación, cuando los árboles son cosechados y en la tierra se vuelve a cultivar (sistemas secuenciales), parte del carbono será lanzado de nuevo a la atmósfera. Por lo tanto, un secuestro efectivo de carbono solo puede ser considerado si hay un balance positivo después de varias décadas, al compararlas con una reserva de carbono inicial (ALBRECHT y KANDJI, 2003).

La implementación de proyectos agroforestales puede ser justificada por múltiples razones:

1. Incrementan el carbono en el suelo aumentando además la sostenibilidad y la productividad de los mismos.
2. Costo financiero de secuestrar carbono mediante proyectos agroforestales es mucho menor que otras formas de mitigación.
3. Aspectos de seguridad alimentaria.

Las reservas de carbono en varias partes del mundo enseñan que significantes cantidades pueden ser removidas de la atmósfera en los próximos 50 años si los sistemas agroforestales son implementados a escala global (ALBRECHT y KANDJI, 2003).

#### **2.4. Carbono y materia orgánica en el suelo**

El carbono en el suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica; la forma orgánica representa la mayor reserva en interacción con la

atmósfera y se estima a nivel global en cerca de 1,500 Pg de C a un metro de profundidad y cerca de 2,456 Pg a dos metros de profundidad. El carbono inorgánico representa cerca de 1,700 Pg (ROBERT, 2002). La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades de carbono que los suelos. Esta es la razón por la cual los cambios en estos depósitos, pueden tener un impacto en el equilibrio global (KANNINEN, 2001).

El carbono orgánico presente en los suelos naturales representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción del que ingresa (1% equivalente a 55 Pg año<sup>-1</sup>) se acumula en la fracción húmica estable (0.4 Pg año<sup>-1</sup>) (ROBERT, 2002). Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos de residencia dependiendo de su composición bioquímica. Por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa y su tiempo de residencia va de décadas o a más de 1,000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con su composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas (PUGET *et al.*, 1995; BALESSENT *et al.*, 2000).

FAO (2000) indica que los modelos conceptuales y de simulación separan la materia orgánica del suelo en fracciones que son fácilmente descompuestas y resistentes, que se caracterizan por bajas tasas de recambio. PARTON *et al.* (1987) dividen a la materia orgánica del suelo en tres fracciones: 1) fracción activa, que consta de microorganismos vivos y productos microbianos, corresponde a 4% del carbono orgánico total (THENG

*et al.*, 1989), y el tiempo de recambio está entre 2 a 4 años; 2) fracción lenta, que es más resistente a descomposición (tiempo de recambio 20-50 años) como resultado de la protección física y química; y 3) fracción pasiva, que es físicamente protegida o químicamente resistente y tiene un tiempo de recambio más prolongado (800 a 1,200 años); estas dos últimas fracciones representan aproximadamente el 96 % del carbono orgánico total (THENG *et al.*, 1989).

#### **2.4.1. El papel fundamental de la materia orgánica en los suelos**

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas (producción y economía) como en sus funciones ambientales, tal como la captura de carbono y calidad del aire. La materia orgánica del suelo es el principal determinante de su actividad biológica, dado que la cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo están directamente relacionadas con ella. La materia orgánica y la actividad biológica que ésta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (ROBERT, 1996). La agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica. Estas a su vez, incrementan la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. La materia orgánica del suelo también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas.

#### **2.4.2. Almacenamiento de carbono en el suelo**

Durante el último siglo, aproximadamente 150 Pg C han sido liberados a la atmósfera como consecuencia de los cambios en el uso de la

tierra. Esto equivale, en proporciones actuales, a aproximadamente 30 años de emisiones de combustible fósil (KANNINEN, 2001).

Por su parte, OADES (1988) indica que varios factores favorecen la retención del carbono en el suelo y permiten mayores tasas de recambio y tiempos de residencia. Estos incluyen, distribución por debajo de la superficie del suelo, asimilados con bajo contenido de nutrimentos, materiales ricos en lignina y ceras, inundación, bajas temperaturas, texturas arcillosas, alta saturación de bases, agregación y superficies de cargas variables. Los factores que aceleran el flujo hacia el suelo de asimilados de carbono en las plantas son: hojarasca con concentraciones altas de asimilados, asimilados ricos en nutrimentos, carbohidratos, aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga. La magnitud con la cual el suelo puede ser un sumidero de carbono depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición y la tasa de rotura del carbono resistente como del carbono adquirido (FAO, 2000).

Un buen sistema agropecuario es el que secuestra más carbono del que emite (NEPSTAD *et al.*, 1991). Las pasturas con base en gramíneas mejoradas secuestran más carbono en partes profundas del perfil del suelo, generalmente debajo de la capa arable (10-15 cm). Esta característica hace que este carbono este menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto su pérdida como gas de efecto de invernadero (FISCHER *et al.*, 1994).

#### **2.4.3. Estimación del almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS)**

La concentración de carbono en el suelo correlaciona con la densidad aparente (DA), la cual varía con la profundidad del suelo, manejo y

otras propiedades físicas. Para calcular la materia orgánica del suelo y almacenaje de carbono, se considera el carbono como el producto de la concentración de COS, DA y el espesor del suelo. De este modo, las comparaciones de carbono en el suelo son basadas en los mismos espesores o volúmenes (por ejemplo, 60 Mg C ha<sup>-1</sup> a 30 cm), por lo tanto, se sugiere expresar el carbono almacenado en términos de una masa equivalente de suelo por unidad de área (ELLERT *et al.*, 2001; FAO, 2006).

#### **2.4.3.1. Densidad aparente**

La densidad es un término que expresa la masa por unidad de volumen de una sustancia. En suelos se denomina densidad aparente porque incluye el espacio poroso. Como regla general, la densidad aparente tiene un valor máximo en suelos de textura gruesa porque tienden a la menor porosidad, aun cuando el tamaño de sus poros es grande. Inversamente, el espacio poroso total de un suelo con textura fina tiende a ser mayor y por tanto, su densidad aparente es baja (CAVOZOS y RODRÍGUEZ, 1992).

#### **2.4.3.2. Profundidad**

La profundidad del perfil es importante, ya que define el volumen de suelo a estimar, además existe un patrón de acumulación de carbono que varía en cada horizonte. Así, tenemos que el perfil "A" superficial es rico en materia orgánica en descomposición y por tanto se espera que sea rico en (COS). Sin embargo, dependiendo del uso anterior o de la cobertura vegetal es posible encontrar casos en los que el perfil "B", cuyo carbono está menos disponible y se acumula, presente mayor contenido de carbono (ELLERT *et al.*, 2001).

### 2.4.3.3. Pedregosidad o rocosidad

La pedregosidad o rocosidad es el contenido de piedras o rocas que interfieren en las labores de labranza, crecimiento de raíces y el movimiento de agua. Se define como el contenido de grava cuyo tamaño varía de 0.2 a 20 mm, las piedras que tienen más de 2 cm de diámetro y rocosidad como la proporción relativa de exposición de la roca fija, ya sea por afloramiento en suelos muy delgados o por conglomerados (MATA, 2003). La pedregosidad o rocosidad presenta las siguientes categorías:

- **Sin pedregosidad:** no hay piedras o rocas o son tan pocas que no interfieren en la preparación del suelo. Las rocas cubren menos de 1 m<sup>2</sup>/ha, o sea inferior de 0,01% del área. Es esta categoría se acepta hasta 5% del volumen del suelo con grava.
- **Ligeramente pedregoso:** el contenido de piedras interfiere con la preparación de terrenos pero sin impedir esta labor.
- **Moderadamente pedregoso:** el contenido de piedras es suficiente para dificultar la preparación del terreno, por lo que esta labor debe desarrollarse cuidadosamente. El área ocupada por las piedras varía de 10 a 300 m<sup>2</sup>/ha o sea 0.1-3% del área. Se acepta de 10 a 15% del volumen del suelo con grava.
- **Pedregoso:** el contenido de piedras sólo permite la utilización de maquinaria liviana o herramientas de mano para preparar el terreno. El área ocupada por las piedras varía de 300 a 800 m<sup>2</sup>/ha, o sea 3-8% del área. Se acepta de 15 a 25% del volumen del suelo con grava.

- **Muy pedregoso:** el contenido de piedras es suficiente para impedir cualquier uso de maquinaria agrícola en la preparación de terrenos por lo que sólo se pueden usar implementos manuales.

- **Fuertemente pedregoso:** la superficie se encuentra cubierta de piedras, las cuales ocupan entre 20 y 50% de la superficie. Sólo se podrán usar implementos manuales ocasionalmente. Se acepta de 50 a 75% del volumen del suelo con grava.

- **Extremadamente pedregoso:** la superficie se encuentra prácticamente cubierta de piedras con más de 50% de la misma cubierta por éstas. Se acepta más de 75% del volumen del suelo con grava.

## **2.5. Los sistemas de producción de café**

El café es cultivado bajo diversos sistemas de producción, resultado de factores socioeconómicos y biofísicos, que comprenden desde los sistemas tradicionales bajo sombra diversificada a los sistemas modernos de monocultivo y/o bajo sombra especializada (SOMARRIBA *et al.*, 2004). Los sistemas tradicionales de producción de café (rústico, policultivo tradicional y comercial), se basan en una estrategia de aprovechamiento integral de recursos locales y se desarrollan en pequeñas superficies de producción. Estos sistemas tradicionales generalmente emplean mano de obra familiar, y el ingreso económico no solo depende de la producción del café sino también de los beneficios obtenidos del componente de la sombra diversificada, tal como frutales, medicinales, maderables. Por el contrario, los sistemas modernos de producción monocultivo bajo sombra y sin sombra, se caracterizan por su

objetivo de obtener máximos rendimientos por unidad de superficie, posee una alta dependencia de insumos externos, predominan las grandes fincas con capital para inversión en mano de obra y agroquímicos, y el componente de árboles de sombra frecuentemente es monoespecífica o eliminada totalmente. (DONALD, 2004).

De acuerdo a la complejidad estructural, composición florística e intensidad de manejo se han realizado clasificaciones de los diferentes sistemas de producción de café predominantes en América Latina. La distribución de estos factores da como resultado un gradiente continuo de sistemas de producción de café que comprenden desde el sistema rústico al monocultivo sin sombra (SOMARRIBA *et al.*, 2004). De acuerdo con la clasificación de los sistemas de producción de café de MOGUEL y TOLEDO (1999), en América Latina existen cinco tipos principales de producción de café:

**2.5.1. Sistema rústico:** se caracteriza por la sustitución del estrato bajo de bosques tropicales y subtropicales por plantas de café. Por lo tanto, la diversidad del dosel arbóreo es preservada en una forma modificada. Este sistema de producción es característico de zonas indígenas, con un manejo mínimo y una nula aplicación de agroquímicos, además de tener un bajo rendimiento.

**2.5.2. Sistema policultivo tradicional:** se trata de un sistema de manejo modificado de bosques nativos, en el cual se establece el café en el estrato bajo, pero a diferencia del sistema rústico, la sombra tiene un mayor manejo ya que se favorecen o introducen especies de interés para los

caficultores. Además, es el resultado del conocimiento tradicional en el manejo de los recursos florísticos de grupos indígenas principalmente.

**2.5.3. Sistema policultivo comercial:** este SAF incluye solo especies de sombra introducidas (cultivadas), en el cual la cobertura forestal ya no se encuentra integrada por los árboles nativos, fomentándose árboles de sombra generalmente de leguminosas y/o con algún valor comercial. Las plantaciones son homogéneas, empleándose en muchos casos una sola variedad de cafetos, por lo que la diversidad florística es considerablemente menor que en el sistema anterior.

**2.5.4. Monocultivo bajo sombra especializada:** es un sistema moderno y comercial de producción de café, en el cual se utilizan solo sombras de leguminosas, tal como *Inga* o *Erythrina* principalmente. De esta forma se crea una plantación monoespecífica bajo un dosel (estrato de sombra) igualmente especializado. En este caso el uso de agroquímicos se torna una práctica obligada y la unidad productiva se concentra en una producción exclusivamente dirigida al mercado.

**2.5.5. Monocultivo bajo sol:** este sistema elimina el componente arbóreo de sombra y representa un sistema agrícola que pierde el carácter agroforestal. Convertido ya en una plantación especializada, el café requiere de grandes insumos de agroquímicos e incluso de maquinaria. En este sistema se alcanzan los más altos rendimientos de café por unidad de superficie.

## 2.6. Antecedentes de la investigación

De acuerdo con YOUNG (1997), la producción de biomasa aérea en diferentes SAF y regiones ecológicas varía de  $2.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  a  $48 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , dependiendo del número de componentes, estratos y arreglos espaciales y temporales. La producción de biomasa subterránea puede variar de  $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  a  $4.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ .

Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica del suelo (MOS) y su estado de residencia, conciernen al tipo de vegetación presente, ingreso de residuos, composición química de los materiales, factores climáticos (temperatura y humedad) y propiedades del suelo, como textura, contenido y mineralogía de arcillas, y nivel de acidez presente (STEVENSON, 1994).

Los sistemas agroforestales almacenan aproximadamente 9, 21, 50 y  $63 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ , en biomasa aérea y raíces de regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas, respectivamente, y el carbono en todos los almacenes se estima entre 12 y  $228 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$  (SCHROEDER, 1994). De acuerdo con OELBERMANN *et al.* (2004), el potencial de almacenamiento de C en biomasa viva en SAF de zonas tropicales es de  $2.1 \times 10^9 \text{ Mg C}\cdot\text{año}^{-1}$ , mientras en zonas templadas es de  $1.9 \times 10^9 \text{ Mg C}\cdot\text{año}^{-1}$ .

RAJAGOPAL (2004) realizó un estudio en Tlapacoyan, Veracruz, en el cual estimó la cantidad de C almacenado en SAF de cítricos en diferentes arreglos espaciales y componentes; los sistemas cítrico + café + plátano, cítrico + café, cítrico + potrero y cítrico + plátano almacenaron 196,

186, 181 y 144 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El C contenido en la biomasa aérea varió entre 41 y 75 Mg C·ha<sup>-1</sup>; la mayor cantidad se encontró en los árboles, siendo cinco veces mayor al C almacenado por arbustos y hierbas. La distribución del C en este reservorio mostró amplias variaciones por el tipo de especies arbóreas, densidad, regímenes de manejo y edad de los sistemas.

Otras experiencias de captura de carbono se han desarrollado por el proyecto Scolel té, en las regiones Tzeltal y Tzotzil del estado de Chiapas. De JONG *et al.* (1997) estiman que el potencial de captura de carbono de sistemas agroforestales, en zonas subtropicales y tropicales, puede oscilar de 40 a 80 y de 60 a 140 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. BALBONTÍN *et al.* (2009) reportaron que el contenido de carbono orgánico del suelo, en diferentes grupos climáticos de México, varía desde 34.75 Mg C·ha<sup>-1</sup> (clima muy seco y semicálido) hasta 168.79 Mg·ha<sup>-1</sup> (clima tropical húmedo con lluvias todo el año).

CALLO-CONCHA (2001), en un estudio realizado en la Amazonia peruana, reportó que la mayor cantidad de C se encontraba en el suelo. Los sistemas como huerto casero, café bajo sombra y silvopastura almacenaron 196, 193 y 120 Mg C·ha<sup>-1</sup>, respectivamente, de los cuales más de 58 % se ubicaba en el suelo. El autor concluyó, además, que los árboles son también un importante reservorio, con 30 % del C.

ÁVILA *et al.* (2001) realizaron evaluaciones sobre almacenamiento de C en cuatro SAF, en andisoles de Costa Rica. Reportaron que el sistema que almacenó más C fue café – *Erythrina poeppigiana*, de 10 años (195 Mg C·ha<sup>-1</sup>); seguido de café-*Eucalyptus deglupta*, de ocho años (169 Mg C·ha<sup>-1</sup>);

*Brachiaria brizantha*-*Acacia mangium*, de tres años ( $96 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ); y *B. brizantha*-*E. deglupta*, de tres años ( $95 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Al comparar los reservorios de C de biomasa aérea y materia orgánica del suelo, a 0.25 m de profundidad, más de 90 % del C se encontró en este último. Concluyeron que el suelo es el principal reservorio y que la cantidad de C almacenado en cada SAF depende del clima, de las condiciones edáficas y del manejo que se brinde al sistema.

CORRAL *et al.* (2006) encontraron almacenamientos de carbono en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano: 66.9, 72.0 y 78.8  $\text{t C}\cdot\text{ha}^{-1}$  en SAF con café y pashaco (*Schizolobium parahybum*), café y guadua, y café y nogal cafetero, respectivamente.

ANACAFÉ (1998) menciona que en Guatemala, un estudio realizado sobre la cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agrosistema Café, encontró valores similares a lo nuestro donde reporta cantidades de C orgánico en el suelo que oscilan de 47.18 a 67.60  $\text{t ha}^{-1}$  de C en diferentes niveles altitudinales y se observa el incremento de almacenamiento de C en el suelo conforme aumenta la altitud.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

La presente investigación se realizó en tres sistemas de uso de la tierra (SUT), constituidos por café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.) (CBS), café (*Coffea arabica* L.) sin sombra (CSS) y sistema silvopastoril (SSP), localizados en el sector Víctor Andrés Belaúnde.

Por su parte, el análisis de suelos se llevó a cabo en el Laboratorio de Conservación de Suelos de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS).

##### **3.1.1. Ubicación política**

El sector Víctor Andrés Belaúnde se localiza en el distrito Nuevo Progreso, provincia Tocache, región San Martín.

##### **3.1.2. Ubicación geográfica (coordenadas UTM)**

Los sistemas de uso de la tierra en estudio, se ubican en las siguientes coordenadas UTM (Cuadro 1):

Cuadro 1. Coordenadas UTM (WGS 84: 18S) de los sistemas de uso de la tierra.

Sistema de uso de la tierra	Vértices de las parcelas	Este (m)	Norte (m)
Café bajo sombra de guaba (CBS)	1	366 886	9 032 453
	2	366 986	9 032 453
	3	366 986	9 032 353
	4	366 886	9 032 353
Café sin sombra (CSS)	1	366 707	9 032 583
	2	366 807	9 032 583
	3	366 807	9 032 483
	4	366 707	9 032 483
Silvopastoril (SSP)	1	367 065	9 032 060
	2	367 165	9 032 060
	3	367 165	9 031 960
	4	367 065	9 031 960

### 3.2. Descripción de los sistemas de uso de la tierra en estudio

#### 3.2.1. Café bajo sombra de guaba (CBS)

Los cafetos presentan una edad de tres años, los mismos que fueron establecidos con el método de plantación cuadrado, con distanciamiento

de 2 m entre plantas; se encuentran asociados con árboles de guaba (*Inga edulis* Mart.) instalados bajo el método cuadrado, con distanciamiento de 20 m; el terreno presenta pendiente de 5%.

### **3.2.2. Café sin sombra (CSS)**

El cultivo de café tiene tres años de edad, cuyas plantas fueron establecidas mediante el método de plantación cuadrado, con distanciamiento de 2 m entre plantas; el terreno de la parcela cuenta con aproximadamente 5% de pendiente.

### **3.2.3. Silvopastoril (SSP)**

Ubicado en un terreno con pendiente aproximada de 0.5 %; el sistema se compone de árboles de capirona (*Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex Schum.) de cuatro años de edad, instalados con el método tres bolillo cada 10 m, asociados con pastos de la especie *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf de cinco años de edad aproximada.

## **3.3. Clima. Presenta un clima tropical húmedo.**

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – San Martín (SENAMHI - San Martín), la precipitación promedio en el área de influencia del estudio es de 2,946.64 mm/año, observándose con mayor frecuencia la presencia de lluvias durante los meses de octubre a abril, con meses transicionales constituidos por mayo y setiembre, y un corto período de estiaje de tres meses (junio - agosto); los mayores volúmenes de precipitación

se registran en los meses de diciembre, enero y febrero, con valores superiores a 300 mm/mes; en tanto el menor valor se presenta en el mes de agosto, con 82 mm/mes.

La temperatura media anual es de 24.6 °C, siendo el mes de noviembre el que presenta la temperatura más baja (25.6 °C) y julio el que presenta el valor más alto (32.6 °C).

La humedad relativa promedio anual más alta es de 70.1% y la más baja es de 68.3% (registrada en la estación meteorológica de Tocache).

### **3.4. Hidrografía y unidades hidrográficas**

La red hidrográfica del área de estudio está representada por el río Huallaga, cuyas aguas discurren de sur a norte, recepcionando un número de cauces menores, los que conjuntamente con los colectores principales, constituyen el canal natural para la evacuación de los excedentes de agua, principalmente en la época de mayores precipitaciones.

### **3.5. Materiales y equipos**

- Pala recta, marco metálico con dimensiones de 25 cm x 25 cm x 10 cm, martillo pesado, cilindros Uhland (de acero inoxidable de 7 cm de alto, 7 cm de diámetro y volumen de 270 cm<sup>3</sup>), bolsas de polietileno de 5 kg de

capacidad y wincha de 5 m; para toma de muestras del suelo referido al análisis del carbono almacenado.

- Machete, con el que se realizó la limpieza (deshierbe) de las áreas de los diferentes sistemas de uso de la tierra.

- Formulario de campo, tablero y bolígrafo; para registro de datos.

- GPS Map 78s y cámara fotográfica digital; para georreferenciación de la parcela y captura de imágenes del procedimiento, respectivamente.

- Estufa, para el secado de las muestras de suelo.

### **3.6. Metodología**

#### **3.6.1. Selección de los sistemas de uso de la tierra**

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron tres sistemas de uso de la tierra constituidos por: café bajo sombra de guaba (CBS), café sin sombra (CSS) y un sistema silvopastoril (SSP), localizados en el sector Víctor Andrés Belaunde.

#### **3.6.2. Delimitación de las parcelas de los sistemas de uso de la tierra**

Cada sistema de uso de la tierra estuvo constituido por una parcela de 100 m x 100 m, delimitada mediante estacas e hilo rafia.

En cada parcela en estudio se establecieron seis puntos de muestreo distribuidos mediante un trazo en zig-zag a lo largo y ancho de la misma, extrayéndose de cada una de ellas tres muestras (0-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente), haciendo un total de dieciocho (18) muestras por parcela o sistema de uso de la tierra; en total se obtuvieron cincuenta y cuatro (54) muestras, que posteriormente fueron analizadas en el laboratorio (Figura 1).

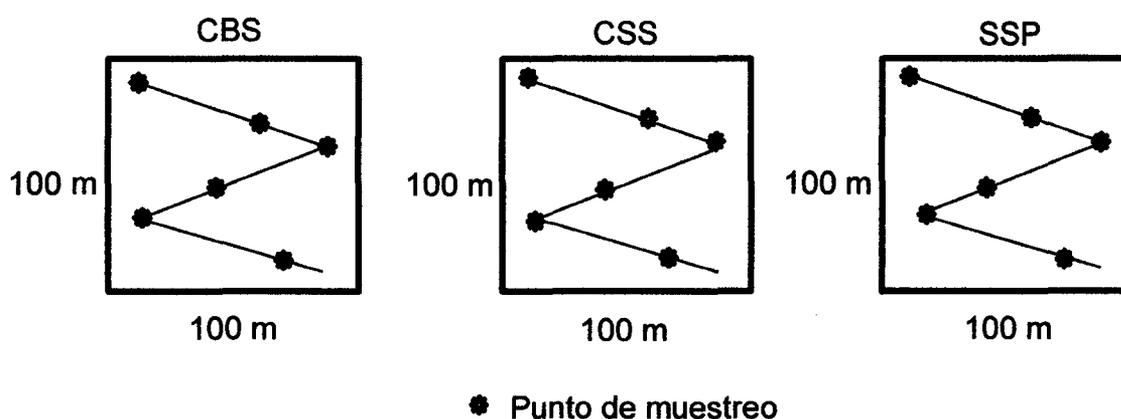


Figura 1. Diagrama de muestreo de suelos para el análisis de la concentración de carbono y propiedades químicas del suelo de cada uno de los sistemas de uso de la tierra.

### 3.6.3. Recopilación de datos de campo

El muestreo del suelo se realizó empleando la metodología recomendada por Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) (ANDERSON e INGRAM, 1993), cuya unidad básica de muestreo fue un marco metálico de 25 cm x 25 cm x 10 cm de profundidad (Figura 2). Para el caso de la

determinación de las propiedades químicas, se hizo la colecta del suelo de cada horizonte correspondiente cada punto de muestreo, obtenido a través del marco metálico; en total se colectaron 18 muestras por cada sistema de uso de la tierra (Figura 2).

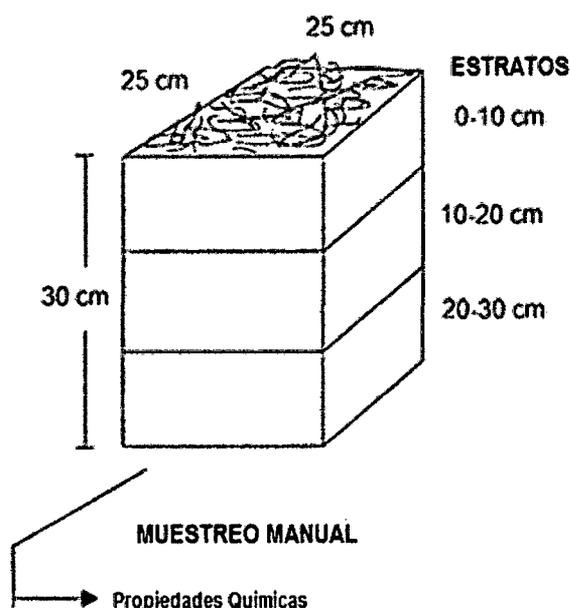


Figura 2. Esquema de muestreo de suelos propuesto por Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) (ANDERSON e INGRAM, 1993).

Las muestras para la determinación del carbono orgánico almacenado en el suelo, fueron tomadas introduciendo un cilindro Uhland de 7 cm de alto y 7 cm de diámetro en cada estrato u horizonte (0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad) de la pequeña calicata generada con el marco metálico (25 cm x 25 cm x 30 cm de profundidad). Se tomaron tres muestras por punto de muestreo, colectándose en total 18 muestras por cada parcela o sistema de uso de la tierra.

### 3.6.4. Estimación del carbono orgánico del suelo

Para la estimación del carbono orgánico del suelo (COS), en cada estrato de evaluación (0 - 10 cm, 10 - 20 cm, y 20 - 30 cm), se empleó la fórmula sugerida por MACDICKEN (1997).

$$\text{COS (t ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^{i=n} ([\text{CO}/100] * \text{Dap} * \text{Ps} * 10,000)_{\text{profundidad}}$$

Donde:

- COS (t h<sup>-1</sup>): carbono orgánico del suelo
- i : profundidad evaluada.
- n : tres estratos o profundidades del suelo
- [CO] : concentración de carbono orgánico en %.
- %CO : 0.58 x %MO (WALKLEY y BLACK, 1938)
- Dap : densidad aparente de la profundidad evaluada (t m<sup>-3</sup>)
- Ps(m) : profundidad de muestreo (m)

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, que consistió en introducir en cada estrato u horizonte del suelo (calicata de 25 cm x 25 cm x 30 cm de profundidad), un cilindro Uhland de 7 cm de alto y 7 cm de diámetro, con el que se extrajo una muestra, la misma que posteriormente fue secada al horno a 105 °C por 72 horas, obteniéndose así el peso seco.

Por otra parte, la concentración de carbono orgánico del suelo (%) fue determinada empleando la conversión sugerida por Walkley y Black (1938),

citados por RÜGNTZ *et al.* (2009). El contenido de materia orgánica del suelo por su parte, se obtuvo empleando las muestras extraídas de cada estrato para la determinación de las propiedades químicas de los tres sistemas de uso de la tierra, las mismas que posteriormente fueron enviadas al Laboratorio de Conservación de Suelos de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS).

### **3.7. Tipo de investigación**

La presente investigación es un estudio observacional, donde se determinó inferencias sobre las variables independientes; asimismo la investigación es de tipo correlacional, el mismo que tiene como propósito conocer la relación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular (HERNÁNDEZ *et al.*, 2006).

#### **3.7.1. Unidades exploratorias (UE)**

Para el estudio se consideraron tres (03) unidades exploratorias: sistema de café bajo sombra de guaba (CBS), café sin sombra (CSS) y sistema silvopastoril (SSP).

#### **3.7.2. Variables independientes**

##### **3.7.2.1. Sistema de uso de la tierra**

- Café bajo sombra de guaba.
- Café sin sombra.
- Silvopastoril.

### **3.7.2.2. Estrato o profundidad del suelo**

- E<sub>1</sub>: 0 - 10 cm de profundidad.
- E<sub>2</sub>: 10 - 20 cm de profundidad.
- E<sub>3</sub>: 20 - 30 cm de profundidad.

### **3.7.3. Variables dependientes**

- Carbono orgánico almacenado en el suelo.
- Materia orgánica del suelo.
- pH del suelo.
- Nitrógeno total.
- Fosforo disponible.
- Potasio disponible.
- Densidad aparente del suelo.

## **3.8. Análisis estadístico**

El diseño estadístico corresponde a un Diseño Completamente al Azar con arreglo factorial de la forma 3A x 3B, con seis repeticiones. Los factores en estudio fueron:

Factor A: Sistema de uso de la tierra (SUT):

- Café bajo sombra de guaba (CBS).
- Café sin sombra (CSS).
- Silvopastoril (SSP).

Factor B: Estrato o profundidad del suelo:

- E<sub>1</sub>: 0 - 10 cm de profundidad.
- E<sub>2</sub>: 10 - 20 cm de profundidad.
- E<sub>3</sub>: 20 - 30 cm de profundidad.

La combinación de los factores descritos generó nueve tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos del experimento factorial.

Tratamiento	Sistema de uso de la tierra (SUT)	Estrato o profundidad del suelo – E (cm)
T <sub>1</sub>	CBS	0 - 10
T <sub>2</sub>	CBS	10 - 20
T <sub>3</sub>	CBS	20 - 30
T <sub>4</sub>	CSS	0 - 10
T <sub>5</sub>	CSS	10 - 20
T <sub>6</sub>	CSS	20 - 30
T <sub>7</sub>	SSP	0 - 10
T <sub>8</sub>	SSP	10 - 20
T <sub>9</sub>	SSP	20 - 30

### 3.8.1. Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + \text{Factor } A_i + \text{Factor } B_j + \text{Factor } A_i * \text{Factor } B_j + \varepsilon$$

**Donde** :

$Y_{ij}$  : Respuesta esperada del i-ésimo Factor A con el j-ésimo Factor B.

$\mu$  : Media de las unidades experimentales.

Factor  $A_i$  : Efecto del i-ésimo Factor A (sistema de uso de la tierra).

Factor  $B_j$  : Efecto del j-ésimo Factor B (estrato o profundidad del suelo).

Factor  $A_i * \text{Factor } B_j$  : Efecto de la Interacción del i-ésimo Factor A con el j-ésimo Factor B.

$\varepsilon$  : Error experimental.

El análisis de varianza se realizó con el software estadístico InfoStat 2013 versión estudiantil libre, y para las diferencias de promedios se utilizó la diferencia mínima significativa de FISHER cuando el valor de  $p < 0.05$  (STEEL y TORRIE, 1988).

El análisis de variancia del experimento factorial se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Análisis de variancia del experimento factorial.

Fuentes de variación	Grados de libertad
Factor A	2
Factor B	2
Factor A * factor B	4
Error	45
Total	53

Para determinar la correlación entre algunos parámetros químicos del suelo sobre el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), se realizó un análisis de correlación utilizando el indicador de Pearson al 5% de nivel de significancia; una vez determinada la correlación, se hizo el cálculo de la regresión lineal sobre las variables que mostraron alta correlación. Asimismo, se incorporan gráficos que describen mejor los comportamientos obtenidos.

## **IV. RESULTADOS**

### **4.1. Propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra: café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.), café (*Coffea arabica* L.) sin sombra y sistema silvopastoril**

#### **4.1.1. Propiedades descriptivas**

Las propiedades químicas del suelo en tres sistemas de uso de la tierra (SUT) fueron analizadas en dos etapas: la primera; a través del uso de estadística descriptiva, donde se describen los promedios con su respectiva desviación (error estándar), así como la variabilidad expresada mediante el coeficiente de variación y el intervalo (LI y LS) a un 95% de confianza.

Con respecto al valor del pH, se observa que los sistemas de uso de la tierra SSP y CSS (sistema silvopastoril y café sin sombra, respectivamente) presentan pH fuertemente ácido (4.75 y 5.33, respectivamente); en tanto el sistema CBS (café bajo sombra de guaba) presenta pH moderadamente ácido (5.51); se observa asimismo, que los tres sistemas presentan variabilidad homogénea (10% de CV). Con respecto a la materia orgánica (MO), los sistemas CBS y CSS presentan nivel medio (3.20 y 2.66%, respectivamente), en tanto el sistema SSP ostenta nivel bajo (1.57%). Por su parte, el nitrógeno (N) mantiene la misma tendencia, donde los sistemas CBS y CSS poseen nivel medio con 0.15 y 0.12%, respectivamente, y el sistema SSP presenta nivel bajo, con 0.09%.

Respecto al fósforo (P), en los tres sistemas se encuentra en un nivel medio (12.27, 12.65 y 8.51 ppm, para CBS, CSS y SSP, respectivamente); cabe acotar que esta propiedad muestra las mayores variabilidades para los sistemas CBS y CSS (86.37 y 94.38% de CV, respectivamente), en tanto el sistema SSP presentó variabilidad moderada (18.11% de CV). Se tiene asimismo, que el contenido de potasio ( $K_2O$ ) en los tres sistemas presenta nivel alto: CBS = 400.31, CSS = 362.65 y SSP = 297.03 kg/ha (Cuadro 4).

Cuadro 4. Propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra.

SUT	Medidas	pH	MO (%)	N (%)	P (ppm)	$K_2O$ (kg/ha)
CBS	Prom. $\pm$ EE	5.51 $\pm$ 0.13	3.20 $\pm$ 0.27	0.15 $\pm$ 0.01	12.27 $\pm$ 2.50	400.31 $\pm$ 30.33
	CV (%)	10.26	35.81	34.38	86.37	32.15
	LI (95%)	5.23	2.63	0.12	7.00	336.31
	LS(%)	5.80	3.77	0.17	17.54	464.31
CSS	Prom. $\pm$ EE	5.33 $\pm$ 0.12	2.66 $\pm$ 0.37	0.12 $\pm$ 0.02	12.65 $\pm$ 2.90	362.65 $\pm$ 45.34
	CV (%)	9.54	57.12	55.67	94.38	51.55
	LI (95%)	5.09	1.88	0.09	6.51	266.54
	LS(%)	5.61	3.44	0.16	18.79	458.77
SSP	Prom. $\pm$ EE	4.75 $\pm$ 0.10	1.57 $\pm$ 0.09	0.09 $\pm$ 0.01	8.51 $\pm$ 0.36	297.03 $\pm$ 19.05
	CV (%)	9.08	24.51	53.16	18.11	27.21
	LI (95%)	4.53	1.37	0.07	7.74	256.83
	LS(%)	4.96	1.76	0.12	9.28	337.23

En el análisis de distribución de los cinco elementos químicos se observa que el sistema SSP es más homogéneo para los valores de  $K_2O$ , P y MO, respecto a los sistemas CBS y CSS; en lo que respecta al N, el sistema CBS resultó más homogéneo; finalmente, el pH en los tres sistemas presenta relativa homogeneidad (Figura 3).

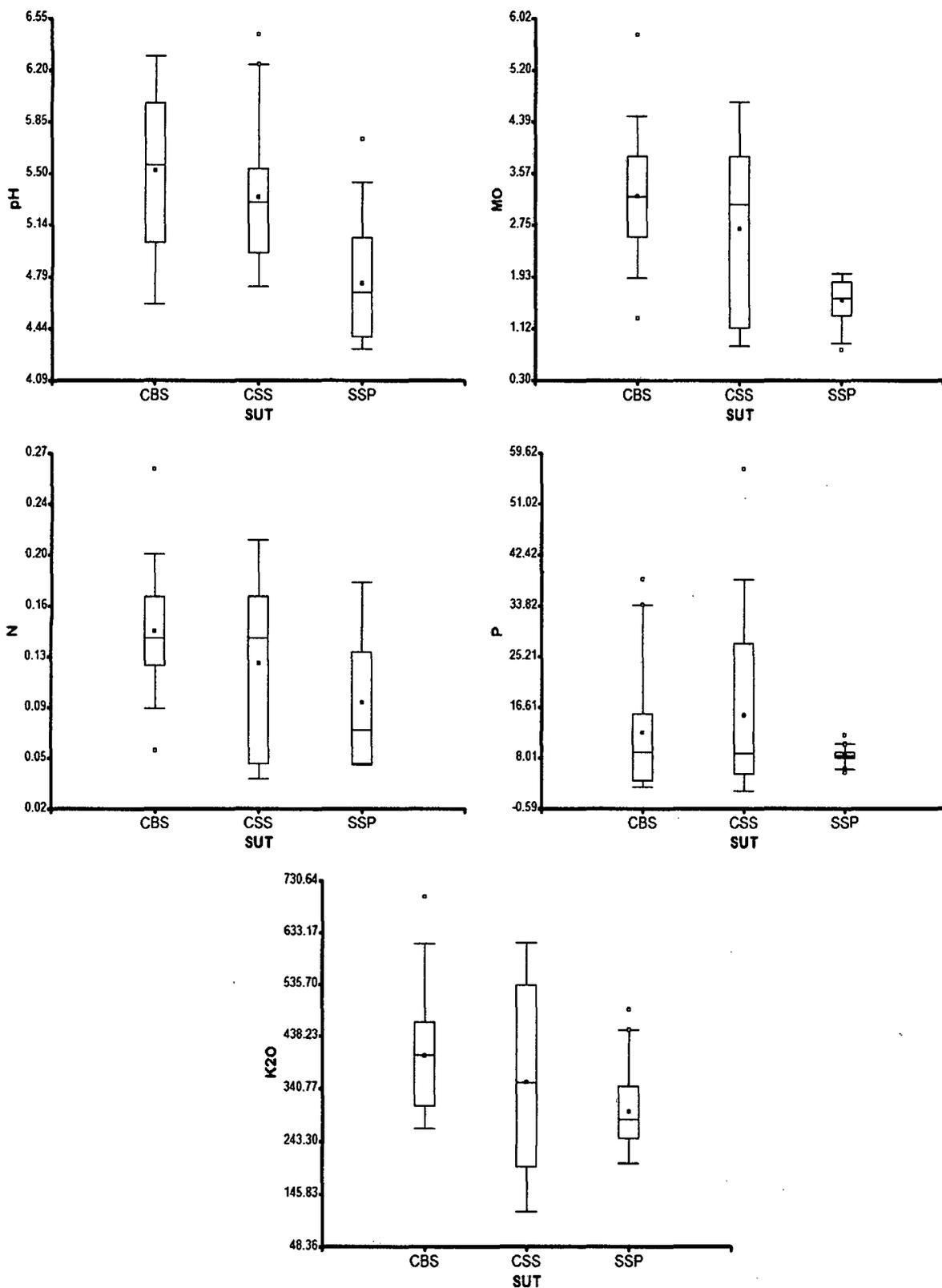


Figura 3. Gráficos de box plot para los elementos químicos analizados en tres sistemas de uso de la tierra.

#### 4.1.2. Inferencias estadísticas

Se muestra el análisis de varianza para las cinco propiedades químicas evaluadas en los tres sistemas de uso de la tierra. Respecto al pH, en el efecto simple (interacción) no se observa significancia estadística ( $p > 0.05$ ), por ello las conclusiones se basaron solo en los efectos principales que tanto para los sistemas de uso de la tierra (SUT) y estratos o profundidades del suelo (E) resultaron significativos ( $p < 0.05$ ); es decir, se observa influencia de los sistemas de uso de la tierra y de los estratos o profundidades del suelo sobre los valores de pH. En lo concerniente a la MO, los efectos simples resultaron altamente significativos ( $p < 0.05$ ), indicando que la variación de la MO se debe a la influencia tanto del sistema de uso de la tierra como del estrato o profundidad del suelo, por lo que los efectos principales no fueron analizados. Para la concentración de nitrógeno (N), la interacción no resultó significativa ( $p > 0.05$ ), razón por la que las conclusiones se basaron solo en los efectos principales que resultaron significativos ( $p < 0.05$ ). En los valores de fósforo (P) y potasio ( $K_2O$ ), se observa que tanto para los efectos simples como para los efectos principales no existe significancia estadística, lo cual evidencia que la variabilidad de P y  $K_2O$  no se debe a la influencia de los sistemas de uso de la tierra ni a los estratos o profundidades del suelo evaluados, sino a diversos factores no identificados. Se observa asimismo, que la mayor variabilidad se presentó en los valores de P (92.26% de CV), seguida de  $K_2O$  (39.98% de CV), por lo cual no se obtuvo significancia estadística (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis de varianza para las propiedades químicas del suelo a un nivel de significancia del 5%.

Fuentes de variación	GL	pH		MO		N		P		K <sub>2</sub> O	
		CM	p-valor	CM	p-valor	CM	p-valor	CM	p-valor	CM	p-valor
SUT	2	2.87	<0.0001 **	12.62	<0.0001 **	0.01	0.0001 **	197.24	0.2094 ns	48,088.80	0.0971 ns
Estrato o profundidad del suelo	2	1.03	0.0159 *	15.46	<0.0001 **	0.05	<0.0001 **	76.47	0.5384 ns	86.83	0.9956 ns
SUT x estrato	4	0.16	0.5861 ns	2.89	0.0003 **	0.002	0.0601 ns	111.13	0.465 ns	25,674.40	0.2801 ns
Error	45	0.23		0.44		0.001		121.81		19573.4	
Total	53										
CV			9.17%		26.61%		26.14%		92.26%		39.98%
R <sup>2</sup>			0.45		0.77		0.75		0.15		0.18

(ns) No Significativo.

(\*\*) Altamente significativo.

La prueba de promedios realizada para los valores de pH y N considerando los efectos principales debido a la no existencia de interacción, muestra que los sistemas de uso de la tierra presentan promedios estadísticamente diferentes para ambos parámetros. Para el pH se observa dos grupos estadísticamente diferenciados; el primero, conformado por los sistemas de uso de la tierra CBS y CSS, que presentan los mayores valores (5.51 y 5.33, respectivamente); el segundo grupo por su parte, conformado por el sistema SSP, que obtuvo el menor valor (4.75). Con respecto al N, cada sistema de uso de la tierra presenta promedios estadísticamente diferentes, resultando el sistema CBS con la mayor concentración (0.15%), seguido del sistema CSS (0.12%) y por el sistema SSP que ostenta la menor concentración (0.09%).

El análisis del segundo factor principal (estrato o profundidad del suelo), muestra para el pH la conformación de dos grupos estadísticamente diferenciados; se observa que los estratos de 0 - 10 y 10 - 20 cm, obtuvieron los mayores promedios (5.29 y 5.38, respectivamente) respecto al estrato de 20 - 30 cm (4.93). En cuanto al contenido de N, se observa que cada estrato es estadísticamente diferente, resultando con mayor concentración el estrato de 0 - 10 cm (0.18%), seguido del estrato de 10 - 20 cm (0.11%) y por último del estrato de 20 - 30 cm (0.07%); es decir, existe una relación inversamente proporcional entre la concentración de N con el estrato o profundidad del suelo, por lo que el contenido del referido elemento disminuye conforme se incrementa el estrato o profundidad del suelo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Prueba de promedios para los valores de pH y N sobre los efectos principales (SUT y E) (Promedio  $\pm$  error estándar).

Sistema de uso de la tierra (SUT)	pH		N	
CBS (Café bajo sombra de guaba)	5.51 $\pm$ 0.13	a	0.15 $\pm$ 0.01	a
CSS (Café sin sombra)	5.33 $\pm$ 0.12	a	0.12 $\pm$ 0.02	b
SSP (Silvopastoril)	4.75 $\pm$ 0.10	b	0.09 $\pm$ 0.01	c
p-valor	<0.0001		0.0001	

Estrato o profundidad del suelo (E)	pH		N	
0-10 cm	5.29 $\pm$ 0.16	a	0.18 $\pm$ 0.01	a
10-20 cm	5.38 $\pm$ 0.14	a	0.11 $\pm$ 0.01	b
20-30 cm	4.93 $\pm$ 0.10	b	0.07 $\pm$ 0.01	c
p-valor	0.0159		<0.0001	

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

El comportamiento del pH y N en los tres sistemas de uso de la tierra, se muestra en la Figura 4.

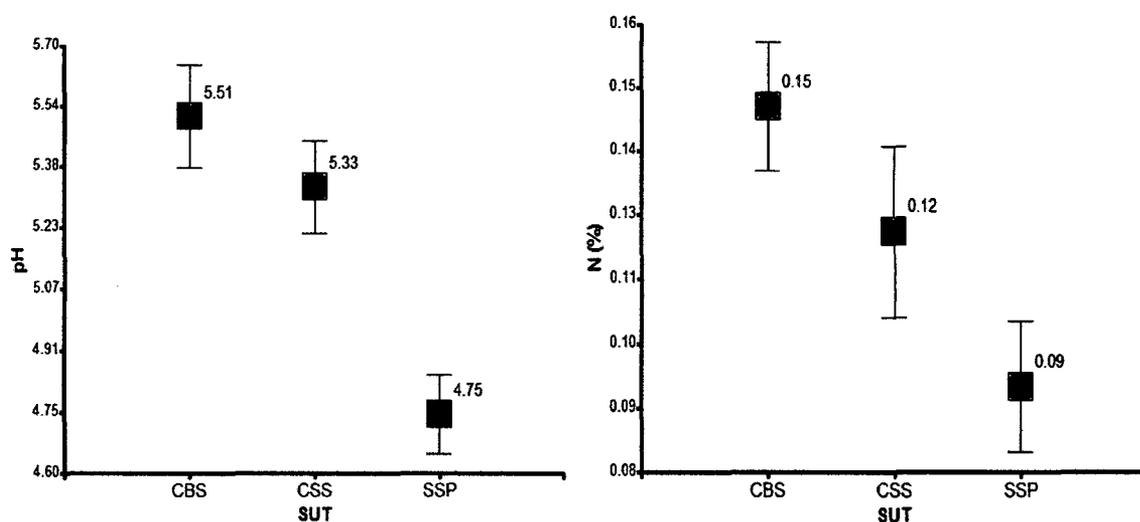


Figura 4. pH y concentración de N en tres sistemas de uso de la tierra.

Los valores de pH y N analizados en tres estratos o profundidades del suelo, se muestran en la Figura 5.

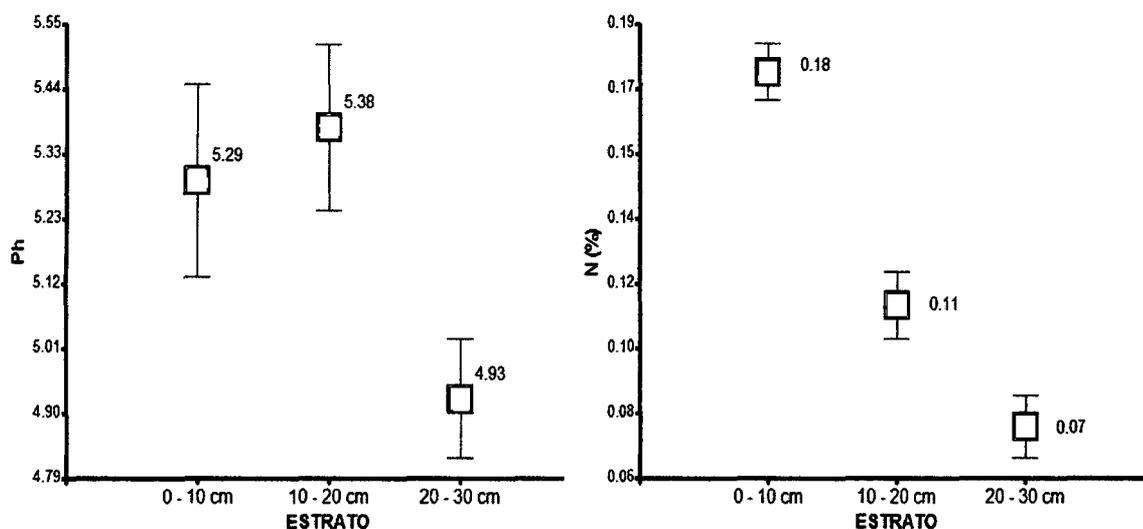


Figura 5. pH y concentración de N en tres estratos o profundidades del suelo.

El valor del pH de los suelos de los tratamientos en estudio, permite realizar la comparación entre ellos, observándose que el sistema de uso de la tierra SSP presenta suelos con valores más bajos, seguido del sistema CSS, clasificándolos como suelos fuertemente ácidos; por su parte, el sistema CBS presenta suelos moderadamente ácidos, con valores de pH mayores a los sistemas de uso de la tierra restantes (Figura 6).

Por otra parte, los contenidos de N muestran que la concentración del citado elemento disminuye conforme se incrementa la profundidad del suelo, comportamiento que mantiene la misma tendencia en los tres sistemas de uso de la tierra (Figura 7).

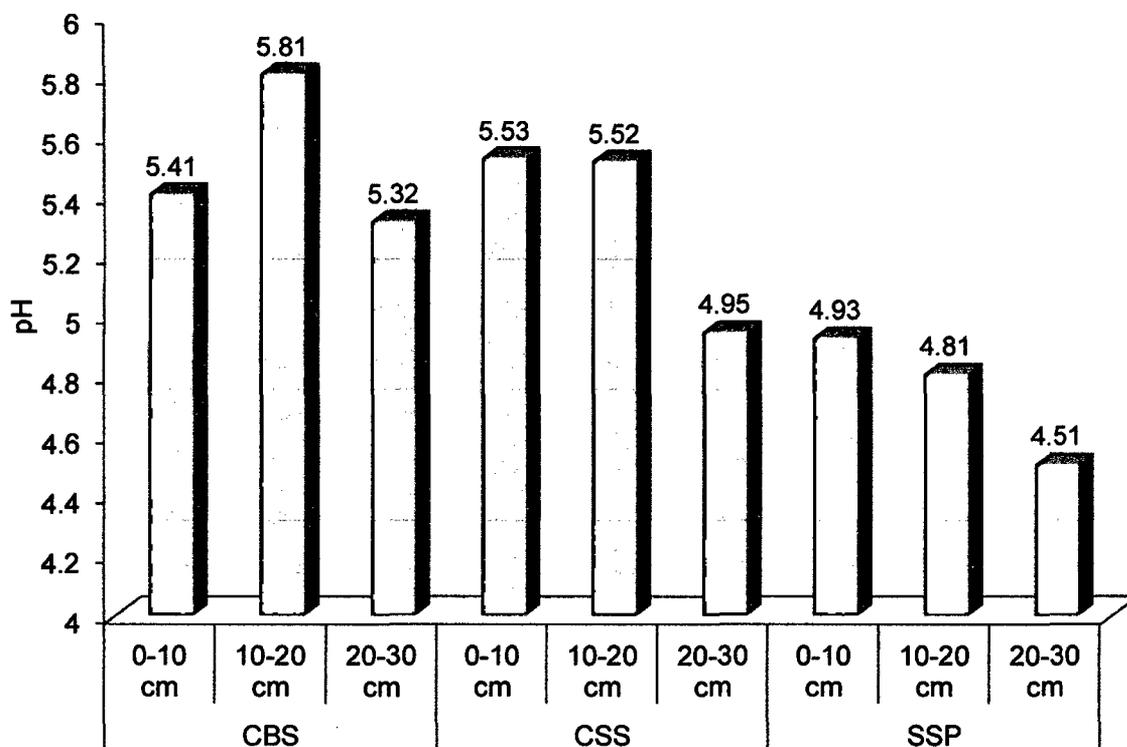


Figura 6. Valores de pH en los tratamientos en estudio.

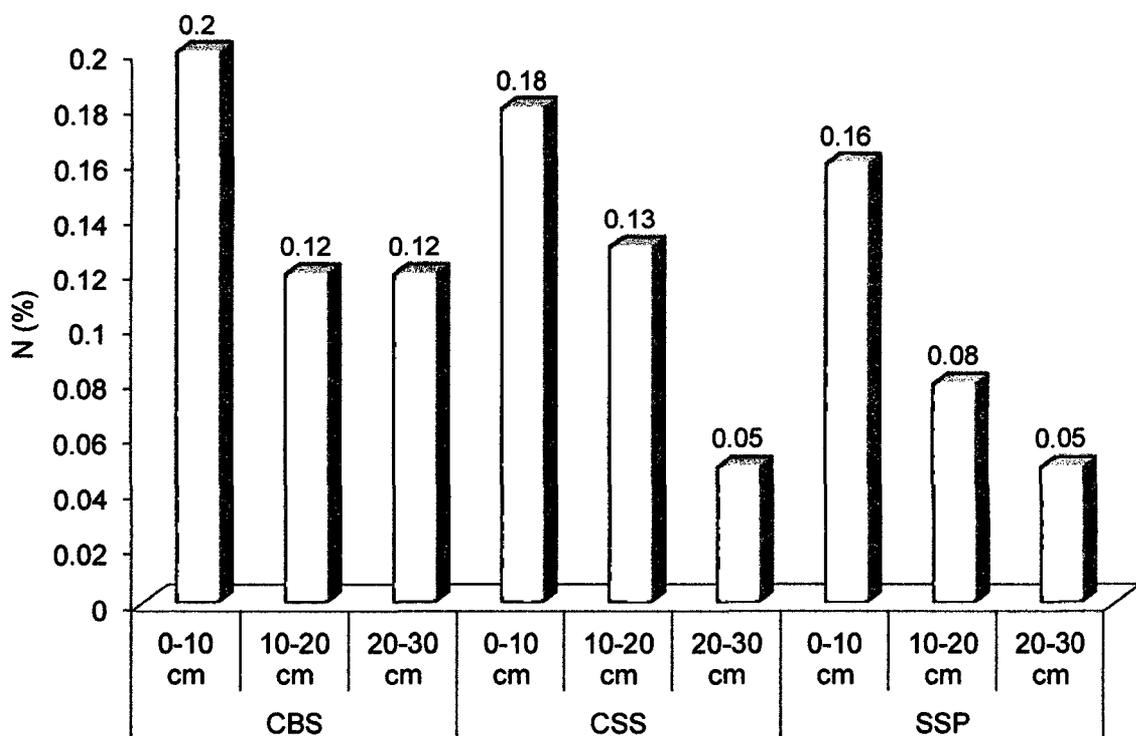


Figura 7. Contenido promedio de N en los tratamientos en estudio.

Para el contenido de MO, se debió abrir la interacción dado que se encontró interacción significativa. Se muestra el análisis de A en b, es decir, la influencia del SUT en cada estrato o profundidad del suelo (E); en el primer estrato (0 - 10 cm), los sistemas de uso de la tierra CBS y CSS presentan mayores contenidos de MO (4.43 y 4.08%, respectivamente) respecto al sistema SSP (1.86%); similar comportamiento se obtiene en el segundo estrato (10 - 20 cm); sin embargo, en el tercer estrato (20 - 30 cm) solo el sistema CBS presenta mayor valor de MO (2.56%), seguido de los sistemas CSS (1.08%) y SSP (1.19%) que presentan contenidos estadísticamente similares. En todos los sistemas se observa además, que a mayor profundidad menor contenido de MO (Cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis del efecto simple para el contenido de MO entre el sistema de uso de la tierra (SUT) y los estratos o profundidades del suelo (promedio  $\pm$  error estándar).

Clave	p-valor	SUT	MO (%)		
A en b <sub>1</sub>					
SUT en el estrato 0 - 10 cm	<0.0001	CBS	4.43	$\pm 0.29$	a
		CSS	4.08	$\pm 0.32$	a
		SSP	1.86	$\pm 0.08$	b
A en b <sub>2</sub>					
SUT en el estrato 10 - 20 cm	0.0243	CBS	2.61	$\pm 0.27$	a
		CSS	2.93	$\pm 0.45$	a
		SSP	1.65	$\pm 0.07$	b
A en b <sub>3</sub>					
SUT en el estrato 20 - 30 cm	0.0012	CBS	2.56	$\pm 0.37$	a
		CSS	1.08	$\pm 0.16$	b
		SSP	1.19	$\pm 0.16$	b

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

Al mostrar con mayor detalle este comportamiento, puede observarse que los sistemas de uso de la tierra CBS y CSS presentan los mayores valores de MO en los dos primeros estratos o profundidades del suelo, en tanto el sistema SSP presenta el menor contenido de MO; sin embargo, en el tercer estrato el sistema CSS se separa y se une en cuanto al contenido de MO al sistema SSP (Figura 8).

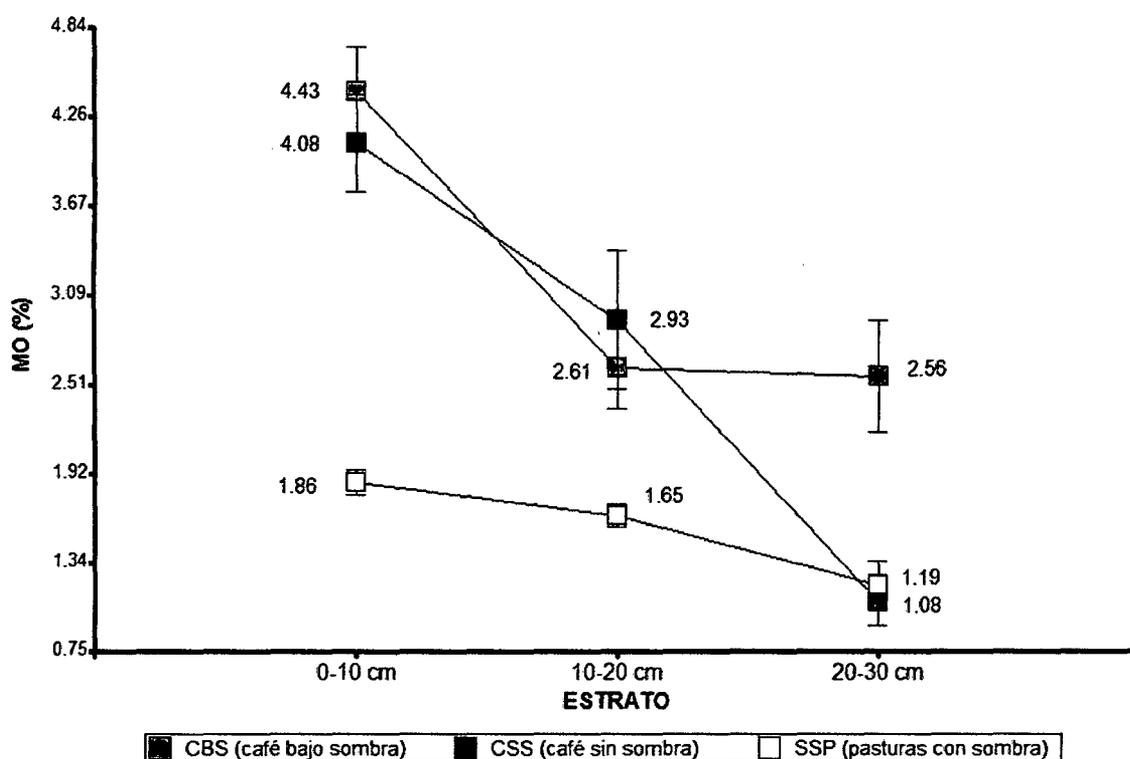


Figura 8. Contenido de MO de acuerdo a los sistemas de uso de la tierra evaluados en tres estratos o profundidades del suelo.

En el análisis de B en a, es decir, los estratos analizados en cada SUT, se observa que en cada SUT los valores de MO disminuyen conforme se incrementa la profundidad. En el sistema CBS, el mayor contenido de MO se logra en el estrato de 0 - 10 cm (4.43%), estadísticamente diferente a los

valores de los estratos subsiguientes (2.61 y 2.56%, respectivamente). En el sistema CSS, se logra una diferenciación mucho más notoria entre cada profundidad del suelo (4.08, 2.93 y 1.08%, respectivamente), es decir, cada profundidad es estadísticamente diferente en cuanto al contenido de MO. Para el sistema SSP, se observa que los dos primeros estratos contienen valores de MO estadísticamente similares (1.86 y 1.65%), mientras el tercero difiere de los dos primeros, con un valor de 1.19% (Cuadro 8).

Cuadro 8. Análisis del efecto simple de los estratos en cada sistema de uso de la tierra como influencia en el contenido de MO (promedio  $\pm$  error estándar).

Clave	p-valor	Estrato o profundidad del suelo (cm)	MO (%)
<b>B en a<sub>1</sub></b>			
		0 - 10	4.43 $\pm$ 0.29 a
Estrato en CBS	0.0009	10 - 20	2.61 $\pm$ 0.27 b
		20 - 30	2.56 $\pm$ 0.37 b
<b>B en a<sub>2</sub></b>			
		0 - 10	4.08 $\pm$ 0.32 a
Estrato en CSS	<0.0001	10 - 20	2.93 $\pm$ 0.45 b
		20 - 30	1.08 $\pm$ 0.16 c
<b>B en a<sub>3</sub></b>			
		0 - 10	1.86 $\pm$ 0.08 a
Estrato en SSP	0.002	10 - 20	1.65 $\pm$ 0.07 a
		20 - 30	1.19 $\pm$ 0.16 b

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

Gráficamente se muestra con mayor detalle el comportamiento antes descrito; como puede observarse, el sistema CSS muestra una mayor diferenciación del contenido promedio de MO en cada estrato o nivel del suelo evaluado, en comparación a los dos sistemas de uso de la tierra restantes (Figura 9).

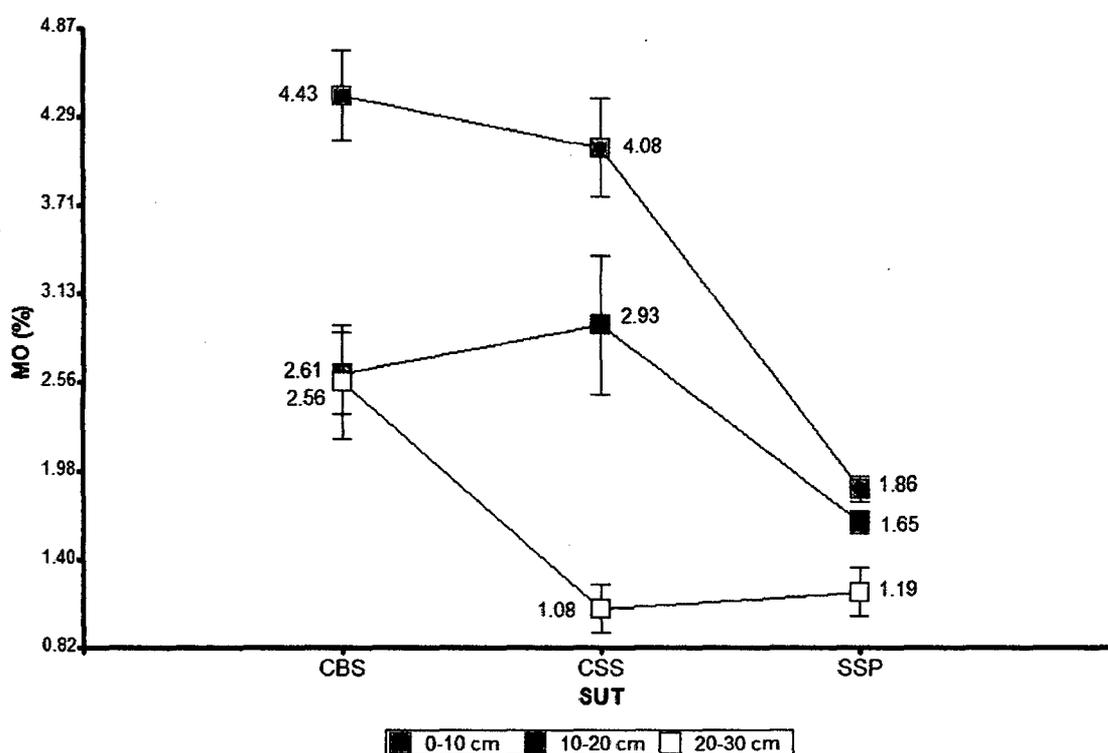


Figura 9. Contenido de MO de acuerdo a cada estrato dentro de cada sistema de uso de la tierra.

Con respecto a las concentraciones de P y  $K_2O$ , estas resultaron no significativas; es decir, tanto los sistemas de uso de la tierra como los estratos o profundidades del suelo, no influenciaron en el contenido promedio de las referidas propiedades químicas. Sin embargo, para entender el comportamiento del P y  $K_2O$  analizado en los tratamientos en estudio, se muestra la Figura 10.

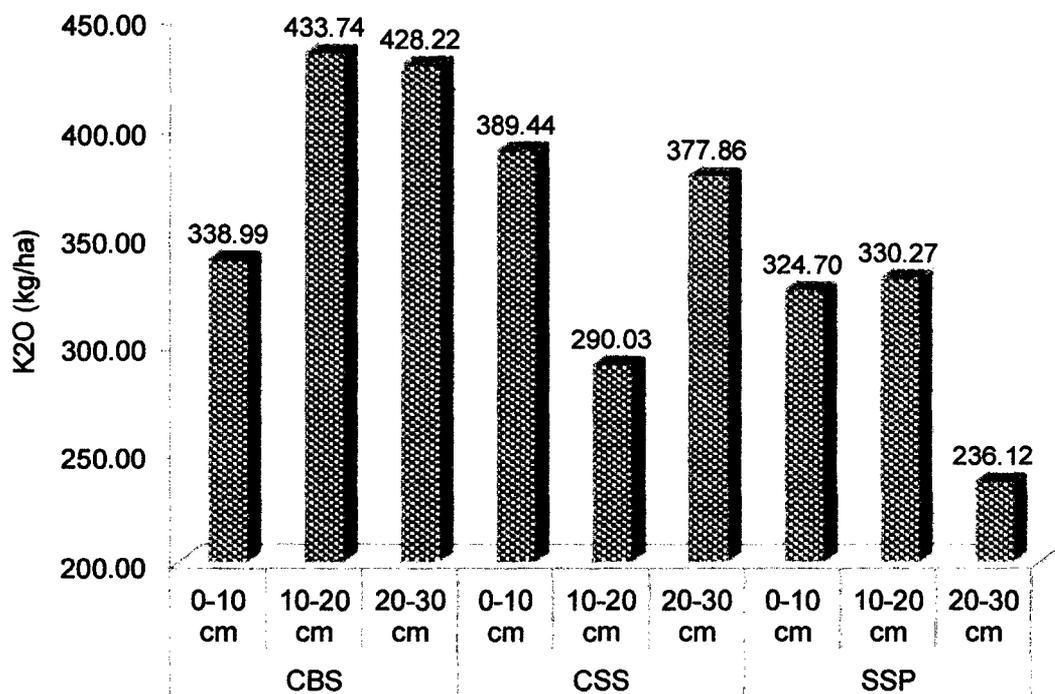
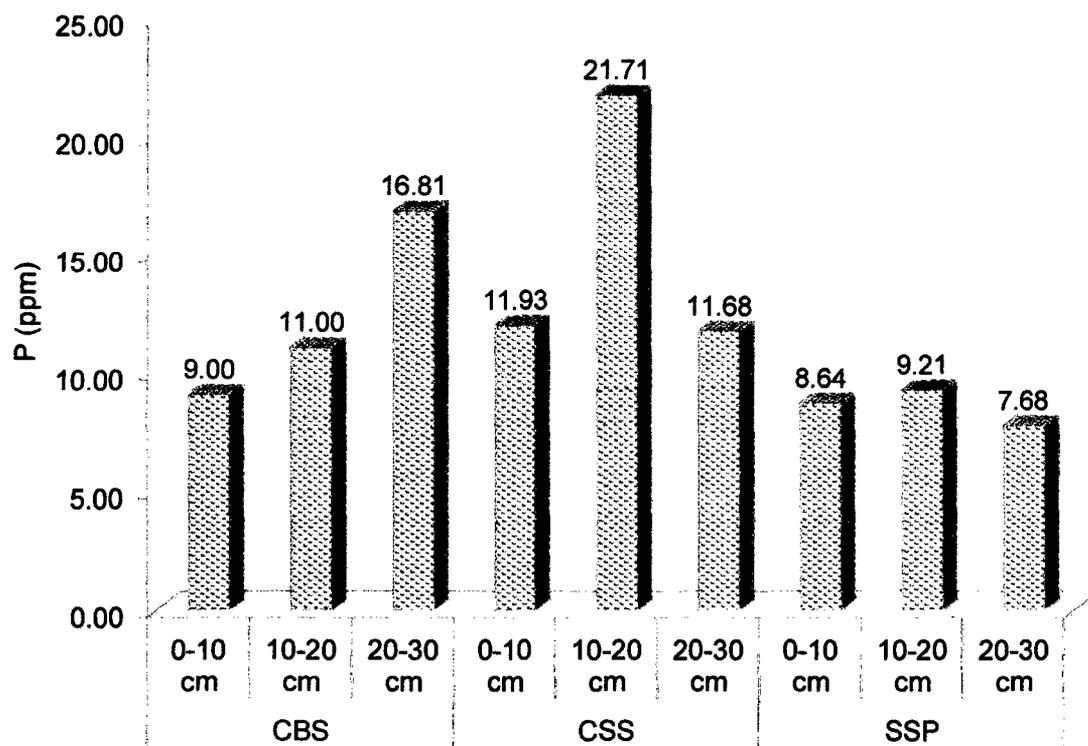


Figura 10. Contenido promedio de P y K<sub>2</sub>O en los tratamientos en estudio.

**4.2. Carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres sistemas de uso de la tierra: café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.), café (*Coffea arabica* L.) sin sombra y sistema silvopastoril**

El análisis de varianza para la densidad aparente (Dap) indica que no existe significancia estadística ( $p > 0.05$ ) para el efecto simple y para los efectos principales, demostrando que la variabilidad del citado parámetro no se debe a los sistemas de uso de la tierra, ni a los estratos o profundidades del suelo evaluados, mucho menos a la interacción de ambos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Análisis de varianza para la densidad aparente del suelo (Dap).

Fuentes de variación	GL	Dap		
		CM	p-valor	
SUT	2	0.04	0.3196	ns
Estrato o profundidad del suelo	2	0.01	0.7017	ns
SUT x estrato	4	0.05	0.2008	ns
Error	45	0.03		
Total	53			
CV			12.00%	
R <sup>2</sup>			0.17	

(ns) No Significativo.

El análisis del carbono orgánico del suelo (COS) presenta dos etapas de inquietud: la primera, si existen diferencias entre los SUT en cada estrato o profundidad del suelo; la segunda, si existen diferencias entre los

SUT en términos generales, asumiendo los contenidos promedios de COS como una suma de parte (estratos). Se observa precisamente, que en el estrato de 0 - 10 cm existe una alta diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) entre los SUT, demostrando que los sistemas CBS y CSS se agrupan estadísticamente con mayores contenidos de carbono (40.15 y 35.89 t C/ha, respectivamente), en comparación con el sistema SSP que presenta un menor contenido (15.21 t C/ha); en la profundidad de 10 - 20 cm este comportamiento se repite; sin embargo, en el estrato de 20 - 30 cm el sistema CBS logra mayor contenido de carbono (20.53 t C/ha), estadísticamente diferenciado ( $p < 0.05$ ) de los sistemas CSS y SSP (9.50 y 10.21 t C/ha, respectivamente). Se evidencia además, que el contenido de COS se reduce conforme se incrementa la profundidad del suelo (Cuadro 10).

Cuadro 10. Análisis de los sistemas de uso de la tierra (SUT) en cada estrato de estudio con respecto al COS (promedio  $\pm$  error estándar).

Clave	p-valor	SUT	COS (t/ha)	
SUT en el estrato 0 - 10 cm	<0.0001	CBS	40.15	$\pm 3.04$ a
		CSS	35.89	$\pm 3.30$ a
		SSP	15.21	$\pm 0.74$ b
SUT en el estrato 10 - 20 cm	0.0189	CBS	20.61	$\pm 1.84$ a
		CSS	26.15	$\pm 3.57$ a
		SSP	15.00	$\pm 1.28$ b
SUT en el estrato 20 - 30 cm	0.0043	CBS	20.53	$\pm 3.14$ a
		CSS	9.50	$\pm 1.44$ b
		SSP	10.21	$\pm 1.53$ b

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

El comportamiento antes indicado, es detallado en la Figura 11.

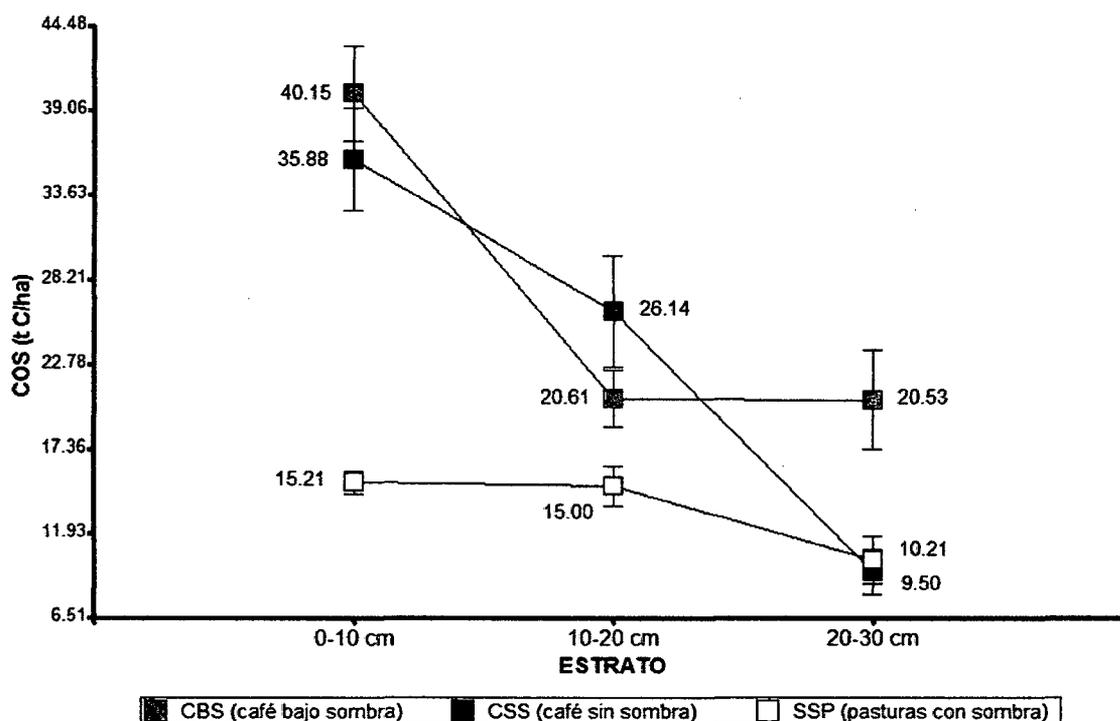


Figura 11. Contenido de carbono orgánico del suelo en tres sistemas de uso de la tierra, evaluados en tres estratos o profundidades del suelo.

El análisis de varianza para los tres SUT respecto al COS, muestra una alta diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los sistemas de uso de la tierra (SUT), una relativa homogeneidad de los datos (20.28% de CV) y un  $R^2$  de 68% que indica el grado de aceptabilidad del modelo propuesto (Cuadro 11).

Cuadro 11. Análisis de varianza de los sistemas de uso de la tierra con respecto al contenido de carbono orgánico del suelo.

Fuentes de variación	GL	COS	
		CM	p-valor
SUT	2	2734.31	0.0002 **
Error	15	170.64	
Total	17		
CV		20.28%	
$R^2$		0.68	

(\*\*) Altamente Significativo.

Debido a la significancia estadística encontrada, se realizó posteriormente una prueba de promedios con el estadístico de Fisher a un 5% de nivel de significancia; en los resultados se observa que tanto los sistemas café bajo sombra de guaba (CBS) y café sin sombra (CSS) obtuvieron mayor concentración de COS (81.30 y 71.53 t C/ha, respectivamente), estadísticamente diferenciados del sistema silvopastoril (SSP) que reportó menor contenido de COS, con 40.42 t C/ha (Cuadro 12).

Cuadro 12. Carbono orgánico del suelo (COS) en tres sistemas de uso de la tierra (SUT) (promedio  $\pm$  error estándar).

SUT	COS (t C/ha)		
CBS (café bajo sombra de guaba)	81.30	$\pm$ 6.26	a
CSS (café sin sombra)	71.53	$\pm$ 6.40	a
SSP (silvopastoril)	40.42	$\pm$ 2.27	b
	p-valor	0.0002	

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

Al expresar con mayor detalle el contenido promedio de COS en los tres sistemas de uso de la tierra, se observa que las mayores concentraciones de COS se encuentran en los sistemas de uso de la tierra CBS y CSS, no encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre ambos; por su parte, el SSP presenta menor cantidad de COS almacenado y difiere estadísticamente de los dos sistemas restantes (Figura 12).

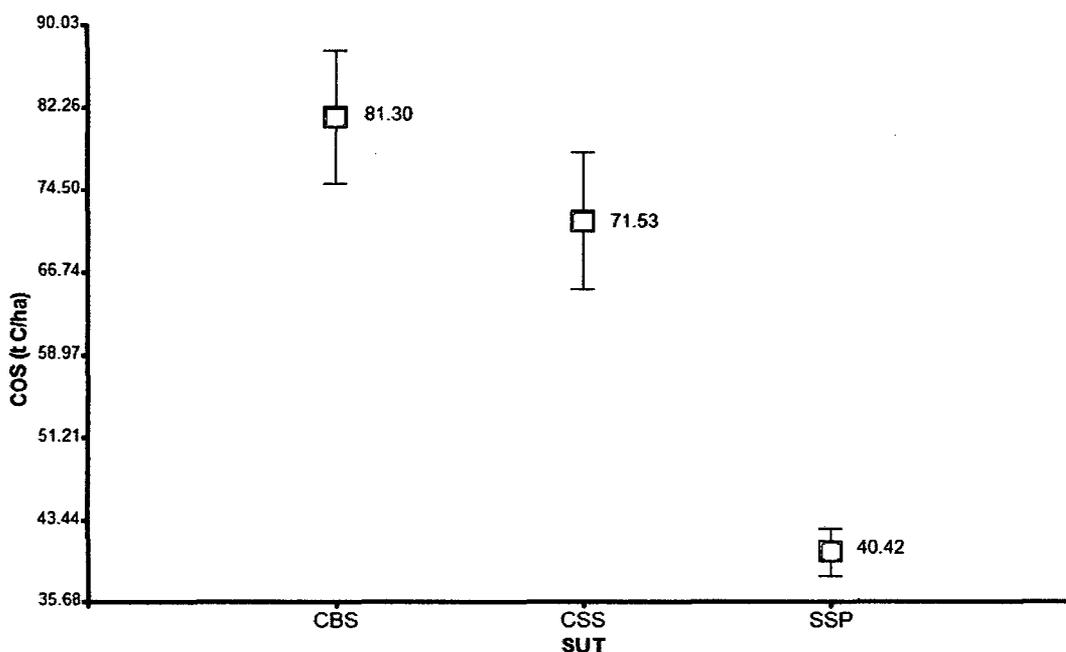


Figura 12. Carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres sistemas de uso de la tierra (SUT).

#### 4.3. Correlación entre las propiedades químicas y la concentración de carbono orgánico del suelo (COS), en tres sistemas de uso de la tierra

En el análisis de correlación de Pearson entre las propiedades químicas y la concentración de COS, debido a la variabilidad de las propiedades químicas del suelo en cada SUT los resultados se muestran para cada uno de ellos. En el sistema CBS existe una alta correlación del COS con la MO y el N (0.96 y 0.95, respectivamente), lo cual se explica también debido a que el nitrógeno (N) es calculado a partir de la MO. En el sistema CSS se repite el comportamiento anterior, es decir, también la MO y el N presentan alta correlación (0.99 para ambos casos). Por su parte, la MO presenta una alta correlación también en el sistema SSP (0.82); sin embargo, solo en este sistema el  $K_2O$  se incorpora como una propiedad química que presenta correlación con el COS, con un coeficiente de 0.55 (Cuadro 13).

La MO presenta en todos los sistemas de uso de la tierra una correlación positiva con el COS; es decir, el COS es directamente proporcional ante cualquier variación de la MO. Por su parte, el N y K<sub>2</sub>O también presentan correlación positiva.

En función a los resultados obtenidos, se determinó las regresiones lineales correspondientes a las variables con alta correlación, las mismas que permitieron determinar las ecuaciones de predicción.

Cuadro 13. Análisis de correlación de Pearson entre las propiedades químicas y el COS.

SUT	Variable 1	Variable 2	Pearson	p-valor	Significancia
	COS	pH	0.02	0.9418	ns
	COS	MO	0.96	<0.0001	**
CBS	COS	N	0.95	<0.0001	**
	COS	P	-0.31	0.2035	ns
	COS	K <sub>2</sub> O	-0.19	0.4592	ns
	COS	pH	0.21	0.4062	ns
	COS	MO	0.99	<0.0001	**
CSS	COS	N	0.99	<0.0001	**
	COS	P	-0.04	0.8744	ns
	COS	K <sub>2</sub> O	-0.01	0.9562	ns
	COS	pH	0.29	0.2476	ns
	COS	MO	0.82	<0.0001	**
SSP	COS	N	0.42	0.0802	ns
	COS	P	0.22	0.3900	ns
	COS	K <sub>2</sub> O	0.55	0.0191	*

Se muestra la regresión lineal para el sistema de uso de la tierra CBS y su respectiva ecuación predictora, que presentan un 91% de ajuste; es decir, el modelo expresa el 91% de la variabilidad total. La ecuación predictora indica que ante una variación de una unidad de MO, el contenido de COS se incrementa en 9.51 t C/ha (Figura 13).

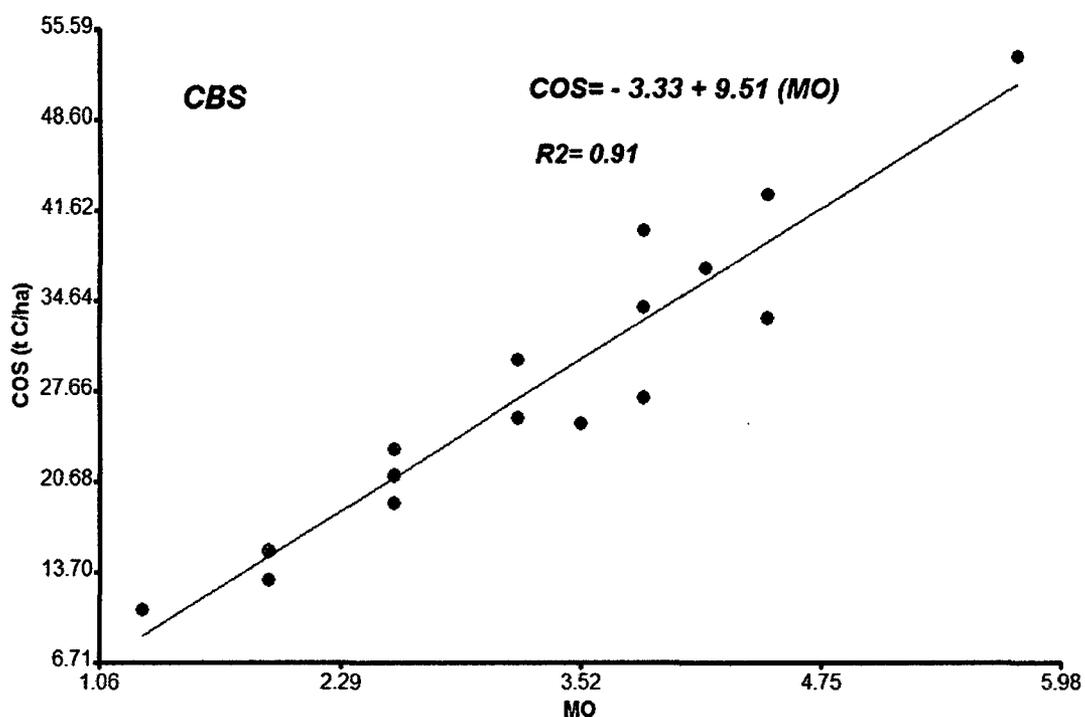


Figura 13. Regresión lineal del COS en el sistema CBS, actuando como regresora la MO.

Asimismo, la regresión lineal para el sistema de uso de la tierra CSS y su ecuación predictora, muestran un 98% de ajuste; es decir, el modelo expresa el 98% de la variabilidad total. La referida ecuación predictora indica que una variación de una unidad de MO, incrementa el contenido de COS en 8.72 t C/ha (Figura 14).

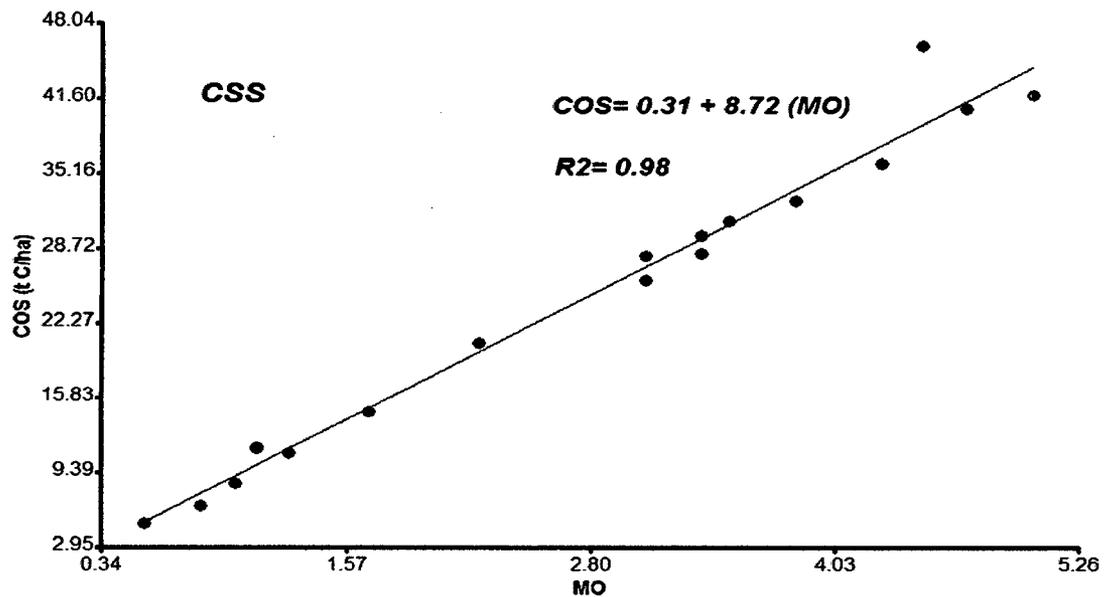


Figura 14. Regresión lineal del COS en el sistema CSS, actuando como regresora la MO.

Por su parte, para el sistema de uso de la tierra SSP, la regresión lineal presenta un ajuste del 67%, el cual indica que existe una alta variabilidad (33%) que no es explicada por el modelo. Esta ecuación indica que ante una unidad de incremento de la MO, se incrementa 7.89 t C/ha de COS (Figura 15).

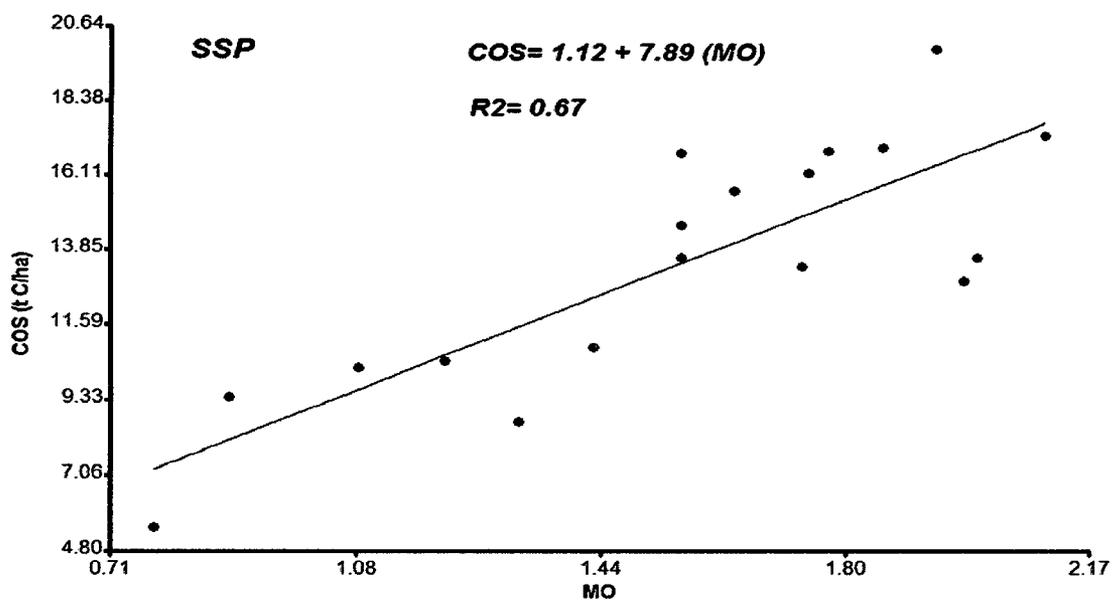


Figura 15. Regresión lineal del COS en el sistema SSP, actuando como regresora la MO.

La regresión lineal para el sistema SSP con respecto al contenido de  $K_2O$ , presenta un ajuste del 30%, es decir, un 70% de la variabilidad no es expresada por el modelo, lo cual se debe a diversos factores no controlados. Es evidente que el  $K_2O$  tuvo elevada variabilidad entre las observaciones, lo que conlleva a no apreciar un adecuado modelo, el mismo que indica que ante una variación de una unidad de  $K_2O$ , se incrementa el COS en 0.02 t C/ha (Figura 16).

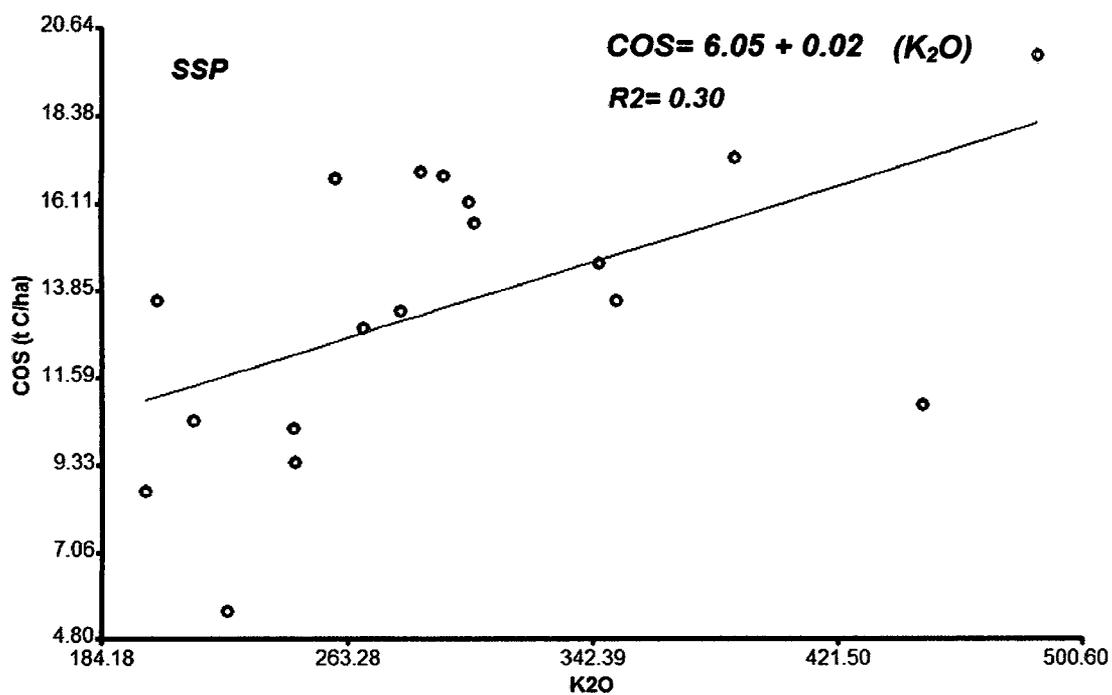


Figura 16. Regresión lineal del COS en el sistema SSP, actuando como regresora el  $K_2O$ .

## V. DISCUSIÓN

### 5.1. Propiedades químicas del suelo de tres sistemas de uso de la tierra: café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.), café (*Coffea arabica* L.) sin sombra y sistema silvopastoril

En la investigación, el sistema café bajo sombra de guaba (CBS) presentó pH moderadamente ácido (5.51), nivel medio de materia orgánica (MO) con 3.20%, nivel medio de nitrógeno (N) con 0.15%, nivel medio de fósforo (P) con 12.27 ppm y nivel alto de K<sub>2</sub>O (400.31 kg/ha); el sistema café sin sombra (CSS) muestra pH fuertemente ácido (5.33), nivel medio MO (2.66%), nivel medio de N (0.12%), nivel medio de P (12.65 ppm) y nivel alto de K<sub>2</sub>O (362.65 kg/ha); por su parte, el sistema silvopastoril (SSP) obtuvo pH fuertemente ácido (4.75), nivel bajo de MO (1.57%), nivel bajo de N (0.09%), nivel medio de P (8.51 ppm) y nivel alto de K<sub>2</sub>O (297.03 kg/ha). Se observa asimismo en todos los sistemas de uso de la tierra, que a mayor profundidad del suelo menor contenido de MO y N.

Como puede observarse, el sistema de uso de la tierra CBS es el que mejor comportamiento tuvo en general, respecto a las propiedades químicas del suelo. Respecto al pH moderadamente ácido del suelo, FARREL (1984) en investigaciones realizadas en México Central, encontró que el valor era mayor bajo los doseles, patrón espacial que se atribuyó fundamentalmente a la redistribución de nutrientes con la caída de las hojas y la acumulación de materia orgánica cerca de los árboles.

El nivel medio de MO según SÁNCHEZ *et al.* (1985), se debe al incremento de la materia orgánica a través de la caída de hojarasca, descomposición de raíces, y biomasa de poda de árboles y residuos de la cosecha del cacao, los cuales se van mineralizando muy lentamente y tienden a acumularse en el suelo.

BRADY y WEIL (2002) añaden al respecto, que la materia orgánica proporciona al suelo N, P y S, de los cuales el principal elemento que aporta para el crecimiento de las plantas es el N; generalmente más del 95% del N total del suelo se encuentra al estado orgánico formando parte de la materia orgánica. Normalmente el contenido de carbono del suelo está estrechamente relacionado con el contenido de nitrógeno; a mayor contenido de materia orgánica existe una mayor cantidad de nitrógeno total, lo que no significa que esté disponible. Debe considerarse que el potencial de mineralización es muy afectado por la temperatura del suelo y por la calidad de la materia orgánica. La combinación adecuada de humedad y temperatura promueve la formación de abundante fitomasa; esta vegetación se recicla, integrándose al suelo e incrementando a través del tiempo el contenido de materia orgánica; sin embargo, esta acumulación alcanza un equilibrio que está determinado por el balance de los factores señalados de humedad y temperatura, y de la propia interacción producida por la vegetación con el suelo.

Lo anteriormente descrito, explica la dinámica de la materia orgánica y su comportamiento en el sistema CBS, en el que pese a ser similar al sistema CSS, el contenido fue mayor.

El nivel medio de P obtenido en el sistema CBS es explicado por ARDENSON (1995), quien manifiesta que uno de los elementos mayores, el fósforo, depende grandemente de la materia orgánica en el trópico. Añade además que el fósforo orgánico puede llegar al 55% del fósforo total del suelo, el resto, 45% corresponde a fósforo inorgánico; sin embargo, no se lixivia fácilmente. Lo anteriormente indicado fundamenta el por qué del mayor contenido de P en el suelo del sistema CBS, el mismo que es producto de la mayor concentración de MO, proveniente como es de suponer, de los árboles de guaba.

Hace referencia asimismo, que los suelos ácidos ( $\text{pH} < 5$ ) y altamente meteorizados de los trópicos (Ultisoles y Oxisoles) normalmente tienen bajo contenido de P disponible para la planta; afirmación que concuerda con los resultados referidos al pH y P del suelo del sistema SSP, en el que el pH fue de 4.75 y la concentración de P menor al resto de sistemas de uso de la tierra. Sobre el tema y dado que se trata de un sistema con presencia de ganadería, DOLAN (1992) y FIXEN (1996) plantean que la compactación del suelo puede reducir la disponibilidad de P, lo cual es un fundamento válido que también explica la menor cantidad de fósforo en el suelo del sistema en referencia. Añade asimismo, que mayor disponibilidad se presenta en suelos con pH de 6 a 7, hecho que explica el mayor contenido de P en los sistemas CBS y CSS.

BEATON (1993) por su parte, menciona que la profundidad de la muestreo del suelo -dado que el P no es móvil en el suelo- influye en su concentración, dado que por lo general dado que mayor cantidad se encuentra en capas superiores.

Respecto al potasio bajo la forma  $K_2O$ , en los tres sistemas alcanzó nivel alto; sin embargo, en el suelo del sistema CBS obtuvo el mayor valor y en el sistema CSS la menor concentración; sobre el tema, SIERRA (1988) sostiene que la fijación del potasio es mayor en suelos pesados y con alto contenido de materia orgánica y es mínima en los arenosos; indica además que el contenido total de K en los suelos en su estado natural, puede variar o mantenerse constante a medida que aumenta la fertilidad dentro del perfil; lo anteriormente referido explica la razón de los altos contenidos de K en los sistemas CBS y CSS.

Por su parte, FAO (2002) menciona que muchos suelos son ricos en K de forma natural, por contener arcillas del tipo de la illita; sostiene asimismo, que también son ricos en potasio los suelos que se abonan frecuentemente con estiércol. Lo expresado anteriormente fundamenta el alto contenido de  $K_2O$  del suelo del sistema SSP, que pese a obtener el menor valor, lo clasifica como nivel alto de K; como es de suponer, al existir ganadería en el sistema, existe incorporación de estiércol, lo cual es corroborado por FAO (2002). SIERRA (1988) aclara aún más el comportamiento del K en el suelo del sistema SSP, al afirmar que el potasio contenido en la materia orgánica del suelo es cuantitativamente poco importante, dado que este elemento se encuentra principalmente asociado a la fracción inorgánica del suelo, es decir, a la fracción arcillosa.

Finalmente, FAO (2002) aduce que las plantas bien provistas con K sufren menos de enfermedades.

## **5.2. Carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres sistemas de uso de la tierra: café (*Coffea arabica* L.) bajo sombra de guaba (*Inga edulis* Mart.), café (*Coffea arabica* L.) sin sombra y sistema silvopastoril**

Los sistemas CBS y CSS obtuvieron mayor concentración de COS (81.30 y 71.53 t C/ha, respectivamente) estadísticamente diferenciados del sistema SSP que reportó menor contenido de COS (40.42 t C/ha).

Al respecto, CALLO-CONCHA (2001) en un estudio realizado en la Amazonia peruana, reportó que la mayor cantidad de C se encontraba en el suelo; donde los sistemas café bajo sombra y silvopastura almacenaron 193 y 120 t C/ha, respectivamente, de los cuales más de 58% se ubicaba en el suelo. La diferencia con la presente investigación radica en que los resultados para esta última fueron menores para ambos sistemas en referencia; lo cual puede deberse a diversos factores tales como: edad de las plantas, la misma que para el sistema CBS fue de tres años y para el sistema SSP de cinco años; asimismo, las labores de manejo de los sistemas. Sobre el tema, ROBERT (2002) manifiesta que el desarrollo de la agricultura ha implicado una gran pérdida de materia orgánica del suelo, y que existe diferentes prácticas de manejo de tierras que pueden ser usadas para aumentar el contenido de la materia orgánica del suelo. El mismo autor añade que las principales formas de obtener un incremento de la materia orgánica en el suelo están asociadas a la agricultura de conservación y convierten la labranza mínima o cero y el uso de una cobertura vegetal continua y protectora formada por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo, como exigencias para manejar un sistema de café con sombra.

Según JANDL (2001), se puede demostrar que existe una gran interacción entre las especies que conforman el sistema agroforestal y el suelo puesto que los altos contenidos de carbono almacenados en este último, son el producto del constante y abundante flujo de este elemento aportado por la biomasa vegetal.

Por su parte, ÁVILA *et al.* (2001) realizaron evaluaciones sobre almacenamiento de C en dos SAF, en andisoles de Costa Rica; reportaron que el sistema que almacenó más C fue café – *Erythrina poeppigiana* de 10 años (195 t C/ha), seguido de café - *Eucalyptus deglupta* de ocho años (169 t C/ha). Al comparar los reservorios de C de biomasa aérea y materia orgánica del suelo a 0.25 m de profundidad, más de 90% del C se encontró en este último. Concluyeron que el suelo es el principal reservorio y que la cantidad de C almacenado en cada SAF depende del clima, de las condiciones edáficas y del manejo que se brinde al sistema. Dichos resultados difieren y son mayores a los alcanzados en el presente estudio; respecto al carbono almacenado en el sistema CBS, probablemente haya sido menor por la edad del sistema (tres años) y por la especie forestal asociada, dado que al parecer la guaba (*Inga edulis* Mart.) requiere de mayor tiempo para aportar mayor cantidad de materia orgánica al suelo. CORRAL *et al.* (2006) en investigaciones realizadas en Ecuador, encontraron que los promedios para los contenidos de carbono total del suelo fueron superiores en el SAF café + laurel con 78.8 t/ha; seguidos por el SAF café + guaba con 72.0 t/ha y el SAF café + pashaco con 66.9 t/ha; los resultados mostrados indican que el SAF café + guaba almacenó menor cantidad de COS que el sistema CBS de la investigación (81.30 t/ha), lo cual podría deberse a que sus condiciones edafoclimáticas fueron ligeramente inferiores a las del sistema CBS.

MONTENEGRO y ABARCA (2001) indican además que el carbono del suelo se encuentra en la hojarasca y en el sistema radicular. Por consiguiente, se debe manejar los SAF de manera que fijen y conserven sosteniblemente carbono en el suelo, lo cual se puede manipular mediante la selección adecuada de especies arbóreas, la ordenación espacial, con la implementación de prácticas de conservación de suelos y por la duración del turno de las especies forestales; a ello se suma la combinación adecuada de humedad y temperatura que promueve la formación de abundante fitomasa.

Acerca del sistema SSP que en el estudio reportó menor contenido de COS (40.42 t C/ha), este resulta también menor respecto al carbono del suelo en pasturas estimado por TRUMBMORE *et al.* (1995) y BALESSENT *et al.* (2000) en 70 t/ha. Así también fue menor al registrado por ÁVILA *et al.* (2001) para *Brachiaria brizantha* - *Acacia mangium* de tres años (96 t C/ha) y *B. brizantha* - *E. deglupta* de tres años (95 t C/ha); al comparar los reservorios de C de biomasa aérea y materia orgánica del suelo a 0.25 m de profundidad, más de 90% del C se encontró en este último; se observa asimismo, que pese a tratarse de la misma especie forrajera, los resultados de la presente investigación evidencian una menor concentración de COS, debido posiblemente a las condiciones edafoclimáticas de la zona en estudio, que se supone fueron las más adecuadas para el área investigada por ÁVILA *et al.* (2001); ello es corroborado por MEJÍA (1997), quien sostiene que la mayor cantidad de carbono almacenado en los suelos de los SAF, obedece a la influencia de factores edafo climáticos que inciden en una favorable capacidad para la acumulación de contenidos muy altos de materia orgánica y por ende de carbono.

Muchas áreas de tierras de pastoreo en las zonas tropicales y áridas son mal manejadas y están degradadas; por lo tanto, ofrecen variadas posibilidades de secuestro de carbono (BALESDENT y ARROUAYS, 1999), razón por la que el menor contenido de COS en la investigación, podría ser atribuido al manejo inadecuado de dicho sistema.

Los resultados de la presente investigación evidencian además que en el estrato de 0 - 10 cm, los sistemas CBS y CSS obtuvieron estadísticamente los mayores contenidos de COS (40.15 y 35.89 t C/ha, respectivamente), seguidos por el sistema SSP (15.21 t C/ha); a una profundidad de 10 - 20 cm el comportamiento fue similar; en el estrato de 20 - 30 cm el sistema CBS logró mayor contenido de COS (20.53 t C/ha) estadísticamente diferenciado de los sistemas CSS y SSP (9.50 y 10.21 t C/ha, respectivamente). Se evidencia además, que el contenido de COS disminuye conforme se incrementa la profundidad del suelo.

En sistemas agroforestales con café en el Valle central de Costa Rica, ÁVILA (2000) determinó los mayores contenidos de carbono en el suelo (perfil 0 - 30 cm), en el sistema café + poro de 10 años de edad (184.4 t/ha) y menor en café + eucalipto de 8 años (108.6 t/ha). FASSBENDER *et al.* (1985), en Turrialba (Región Atlántica) de Costa Rica, obtuvieron 164.4 t/ha de carbono almacenado a una profundidad del suelo de 45 cm, en SAF con café. Finalmente, MÁRQUEZ (1997) reporta datos de 93.3 a 117.5 t/ha de carbono. Los valores referidos son mayores a los obtenidos en la presente investigación.

ANACAFÉ (1998) por su parte, en Guatemala reportó de 55 a 60 t/ha en SAF con café, de 0 a 15 cm de profundidad. En cafetales de Turrialba,

Costa Rica, MONTENEGRO y ABARCA (2001) determinaron que la cantidad de carbono almacenado en sistemas cafetaleros, en el perfil del suelo 0 - 30 centímetros, fue de 19.8 t/ha. Estos valores se encuentran por debajo de los contenidos de carbono encontrados en el suelo de los sistemas CBS y CSS del presente estudio.

Por su parte, MUÑOS (2006) afirma que el contenido de carbono en el suelo disminuye con la profundidad, lo cual corrobora los resultados obtenidos en el estudio. Además el mismo investigador determinó que un 65 – 70% del total del total de carbono se encuentra en los primeros 10 cm. del suelo.

### **5.3. Correlación entre las propiedades químicas y la concentración de carbono orgánico del suelo (COS), en tres sistemas de uso de la tierra**

En el sistema CBS existe una alta correlación del COS con la MO y el N (0.96 y 0.95, respectivamente); en el sistema CSS se repite el comportamiento anterior (0.99 para ambas propiedades); por su parte, la MO presenta una alta correlación también en el sistema SSP (0.82), sin embargo, solo en este sistema el  $K_2O$  se incorpora como una propiedad química que presenta correlación con el COS (0.55).

La MO presenta en todos los sistemas de uso de la tierra una correlación positiva con el COS, es decir, el COS es directamente proporcional ante cualquier variación de la MO; por su parte, el N (en los sistemas CBS y CSS) y el  $K_2O$  en el sistema SSP, también presentan correlación positiva.

MARTÍNEZ *et al.* (2004) sostienen al respecto, que con cero labranza se promueve la acumulación de MO, principalmente según REYES *et al.* (2002), en los primeros centímetros del perfil de suelo. Los resultados de la presente investigación son coherentes con las afirmaciones anteriores, sobre todo en el sistema CBS en el que la mayor actividad fue la cosecha del café y el deshierbe periódico, dado que la hojarasca de los árboles de guaba y los restos de la cosecha del café, cumplieron la importante función de incorporar MO al suelo.

Por su parte, DEMOLON (1944) manifiesta que existe una estrecha relación entre el carbono y el nitrógeno de los suelos. LYON y BUCKMANN (1947) aluden asimismo, que como consecuencia de la referida relación más o menos definida entre el nitrógeno orgánico y la materia orgánica, el nivel de esta, que puede ser mantenido en cualquier suelo, dependerá de la cantidad de nitrógeno presente, por lo que el contenido de este elemento puede servir como indicador de la tasa de materia orgánica del suelo. Lo anteriormente indicado fundamenta claramente los resultados del estudio, donde la MO presenta correlación positiva con el COS en todos los sistemas de uso de la tierra; así como el nitrógeno que también genera correlación positiva con el COS en los sistemas CBS y CSS; .

La correlación positiva de la MO con el COS en los tres sistemas de uso de la tierra y la correlación positiva del nitrógeno con el COS en los sistemas CBS y CSS obtenidas en la presente investigación, mantienen congruencia con lo referido por FASSBENDER (1993), quien sostiene que suelos con alto contenido de materia orgánica, naturalmente, tienen un alto contenido de nitrógeno; hecho que es sustentado por MÜLLER *et al.* (1998),

quien observó en Costa Rica que los contenidos de carbono orgánico se mantuvieron en porcentajes similares a los de la materia orgánica, manteniendo comportamiento similar los contenidos de nitrógeno. Finalmente, los resultados del presente estudio son confirmados por SIX *et al.* (2004) quien afirma que el mayor nivel de COS está relacionado con la mayor concentración de materia orgánica, y por JACKSON (1964), al manifestar que el COS es el principal elemento que forma parte de la MO.

Así también, en el estudio el  $K_2O$  logró correlación positiva solo en el sistema SSP, resultado que es corroborado por REYES *et al.* (2002) al determinar que el contenido de COS se correlaciona positivamente con el nitrógeno total, potasio disponible y relación C/N, indicando además, que la materia orgánica es anfotérica (tiene cargas positivas y negativas) y su carga depende de pH y generalmente es netamente negativa, por eso, el Ca, Mg, y K están ligados electroestáticamente a la materia orgánica del suelo.

## **VI. CONCLUSIONES**

- 1. El sistema CBS presenta pH moderadamente ácido (5.51), nivel medio de materia orgánica (MO) con 3.20%, nivel medio de nitrógeno (N) con 0.15%, nivel medio de fósforo (P) con 12.27 ppm y nivel alto de K<sub>2</sub>O (400.31 kg/ha). El sistema CSS muestra pH fuertemente ácido (5.33), nivel medio de MO (2.66%), nivel medio de N (0.12%), nivel medio de P (12.65 ppm) y nivel alto de K<sub>2</sub>O (362.65 kg/ha). El sistema SSP presenta pH fuertemente ácido (4.75), nivel bajo de MO (1.57%), nivel bajo de N (0.09%), nivel medio de P (8.51 ppm) y nivel alto de K<sub>2</sub>O (297.03 kg/ha).**
- 2. El contenido de MO en el primer estrato (0 - 10 cm) es mayor en los sistemas de uso de la tierra CBS y CSS (4.43 y 4.08%, respectivamente), seguido del sistema SSP (1.86%); comportamiento similar se obtuvo en el segundo estrato (10 - 20 cm); en el tercer estrato (20 - 30 cm) solo el sistema CBS presentó mayor contenido (2.56%), seguido de los sistemas CSS (1.08%) y SSP (1.19%) con contenidos estadísticamente similares.**
- 3. Los sistemas CBS y CSS obtuvieron mayor concentración de COS (81.30 y 71.53 t C/ha, respectivamente) estadísticamente diferenciados del sistema SSP que reportó menor contenido de COS (40.42 t C/ha).**
- 4. En el estrato de 0 - 10 cm, los sistemas CBS y CSS obtuvieron estadísticamente los mayores contenidos de COS (40.15 y 35.89 t C/ha,**

respectivamente), seguidos por el sistema SSP (15.21 t C/ha); a una profundidad de 10 - 20 cm el comportamiento fue similar; en el estrato de 20 - 30 cm el sistema CBS logró mayor contenido de COS (20.53 t C/ha) estadísticamente diferenciado de los sistemas CSS y SSP (9.50 y 10.21 t C/ha, respectivamente). Se evidencia además, que el contenido de COS disminuye conforme se incrementa la profundidad del suelo.

5. En el sistema CBS existe una alta correlación del COS con la MO y el N (0.96 y 0.95, respectivamente); en el sistema CSS se repite el comportamiento anterior (0.99 para ambas propiedades); por su parte, la MO presenta una alta correlación también en el sistema SSP (0.82), sin embargo, solo en este sistema el  $K_2O$  se incorpora como una propiedad química que presenta correlación con el COS (0.55).

## VII. RECOMENDACIONES

1. Monitorear el carbono almacenado en el suelo de los tres sistemas de uso de la tierra en estudio (CBS, CSS y SSP), con la finalidad de evaluar el secuestro de carbono por hectárea por año.
2. Sensibilizar a los agricultores acerca de la importancia de producir café asociado a especies arbóreas, principalmente guaba (*Inga edulis* Mart.), dada su importancia en el aporte de materia orgánica y nitrógeno, pudiendo además, almacenar cantidades adicionales de carbono orgánico en el suelo.
3. Agricultores que producen café en sistemas agroforestales agrupados con personería jurídica, deben establecer negociaciones y/o convenios con instituciones nacionales, con el objeto de generar el pago por servicios ambientales de captura de carbono, como una actividad adicional al usufructo de sus tierras.

**CHEMICAL PROPERTIES AND ORGANIC CARBON STORED IN SOIL OF  
THREE SYSTEMS LAND USE - NUEVO PROGRESO DISTRICT,  
SAN MARTÍN REGION**

**VIII. ABSTRACT**

CO<sub>2</sub> is the gas that contributes to global warming, accounting for changing land use with higher emission activity. Therefore, the objectives of the research were: determine the chemical properties and organic carbon stored in the soil of three systems of land use: coffee (*Coffea arabica* L.) under shade of guaba (*Inga edulis* Mart.), coffee without shade, and silvopastoral system; likewise, find the correlation between chemical properties and the soil organic carbon (SOC). The three systems of land use are located in the sector Víctor Andrés Belaúnde, Nuevo Progreso district, Tocache province, San Martín region. The soil sampling was carried out using the recommended methodology by Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), and the estimation of SOC in each stratum was done with the formula suggested by MacDicken (1997). Was applied the Completely Randomized Design with factorial arrangement 3A x 3B and six repetitions; the factors under study were: factor A: systems land use (coffee under shade, coffee without shade and silvopastoral system) and factor B: stratum or soil depth (0-10, 10-20 and 20-30 cm), with nine treatments. The results show that the coffee system under shade has moderately acid pH (5.51), medium level of organic matter (OM) with 3.20%, medium level of nitrogen (N) with 0.15%, medium level of phosphorus (P) with 12.27 ppm and

level high K<sub>2</sub>O (400.31 kg/ha); the coffee system without shade displays an strongly acid pH (5.33), medium level of OM (2.66%), medium level of N (0.12%), medium level of P (12.65 ppm) and K<sub>2</sub>O high level (362.65 kg/ha); the silvopastoral system has strongly acid pH (4.75), low level of OM (1.57%), low level N (0.09%), medium level of P (8.51 ppm) and high level K<sub>2</sub>O (297.03 kg/ha). The coffee under shade and the coffee without shade have obtained major concentration of SOC (81.30 and 71.53 t C/ha, respectively) statistically differentiated of silvopastoral system that has SOC minor (40.42 t C/ha). In the coffee under shade system there is a high correlation of the SOC with the OM and N (0.96 and 0.95, respectively); in the coffee system without shade is repeated the above behavior (0.99 for the two properties); while in the silvopastoral system the OM has a high correlation (0.82), obtaining the K<sub>2</sub>O only in this system, correlation with the SOC (0.55).

## **IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALBRECHT, A., KANDJI, S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99. (1-3):15-27.
- ANACAFÉ (ASOCIACIÓN NACIONAL DE CAFÉ). 1998. Cuantificación estimada de dióxido de carbono fijado por el agro ecosistema café en Guatemala. Guatemala. 35 p.
- ANDRASKO, K. 1990. El recalentamiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. *Unasyva*. 41(163):3-9.
- ÁVILA, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 99 p.
- ÁVILA, G., JIMÉNEZ, F., BEER, J., GÓMEZ, M., IBRAHIM, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*. 8(30),32-35.
- BALBONTÍN C.C., CRUZ, C.O., PAZ, F., ETCHÉVERS, J. D. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. *In: Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*. Ed. por L. Rattan, Follett R.F. 2 ed. Special Publication 57. Madison, WI, USA.

- BALESDENT, J., CHENU, C., BALABANE, M. 2000. Relationship of Soil Organic Matter Dynamics to Physical Protection and Tillage. [En línea]: FAO, (<http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s05.htm>, 10 Oct. 2006).
- BRACK A., MENDIOLA C. 2000. Ecología del Perú. PNUD. Lima, Perú. Ed. Bruño.
- BRADY, N.C., WEIL, R.R. 2002. Soil organic matter. En: The nature and properties of soils. Eds. Helba, S., Yarnell, D. and Carnis, M. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, United States of America. p. 498-542.
- CALLO-CONCHA, D.A. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.
- CAVAZOS, T., RODRÍGUEZ, O. 1992. Manual de prácticas de física de suelos. México, Trillas. 98 p.
- CENTENO, J. 1992. El Efecto Invernadero. *Planiuc*. 18(19):75-96.
- CIESLA, W. 1995. Cambio climático, bosques y ordenamiento forestal, una visión de conjunto. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 146 p.
- CORRAL, R., DUICELA, L.A., MAZA, H. 2006. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábico y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, "Avances del Conocimiento para la preservación del suelo". Guayaquil, Noviembre 22-24 del 2006. 15 p.

- CUBERO, J., ROJAS, S. 1999. Fijación en plantaciones de Melina (*Gmelina arborea Roxb*), teca (*Tectona grandis L.f*) y pachote (*Bombacopsis quinata Jacq*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lc. Cs. For. Concentración de Manejo Forestal. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional. 95 p.
- DE JONG, B., TIPPER, R., TAYLOR, R. 1997. A Framework for monitoring and evaluation of carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2:231-246.
- DEMOLON, A. 1944. *La dynamique du sol*. Dunod, Paris.
- DIXON, K. 1995. Sistemas agroforestales y gases de invernadero. *Agroforestería en las Américas*. 2(7):22-26.
- DONALD, P.F. 2004. Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. *Conservation Biology*. 18(1):17-37.
- ELLERT, B.H., JANZEN, H.H., MCCONKEY, B.G. 2001. Measuring and comparing soil carbon storage. *In: Assessment Methods for Soil Carbon*. R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, B.A. Stewart. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p. 131-144.
- FAO (ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN). 2000. *Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO<sub>2</sub>*. *Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Roma. 88:98.
- FAO (ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN). 2006. *La evaluación del almacenamiento del*

carbono en el suelo y los principales cambios. UN Food and Agriculture Organization. [En línea]: FAO, (<http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s06.htm>, 10 Oct. 2015).

FAO (ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN). 2007. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Pagos a los agricultores por servicios ambientales. Agricultura – 38. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 255 p.

FASSBENDER, H.W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2 ed. Serie de materiales de enseñanza (N° 29). Turrialba, Costa Rica. 491 p.

FASSBENDER, H., ALPIZAR, L., HEUVELDOP, J., ENRIQUEZ, G., FOLSTERS, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) o poró (*Erythrina poeppigiana*), en Turrialba, Costa Rica. In Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba, Costa Rica. 35(3):233-242.

FERNÁNDEZ, W. 1991. Cambios Climáticos: El calentamiento global. Tecnología en Marcha. 11(2):11-22.

FISCHER, M.J., RAO, I.M., AYARZA, C.E., SAENZ, J.I., THOMAS, R.J., VERA, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. Nature. 31:236-238.

FOLEY, J. 2005. Global consequences of land use. Science. 309:570-573.

FOURNIER, L. 1996. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. Boletín PROMECAFE. (IICA). 71:7-13.

- GALLOWAY, G., BEER, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. CATIE, Turrialba, Costa Rica (Serie Técnica. Informe Técnico N° 285). 166 p.
- IBRAHIM, M.; CHACÓN, M.; CUARTAS, C.; NARANJO, J.; PONCE, G.; VEGA, P.; CASASOLA, F.; ROJAS, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. 45:27-36.
- IPCC. 2005. Panel Intergubernamental sobre cambio climático: La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas. Informe del Grupo de trabajo III del IPCC. Ed. por B. Metz, A. Davidson, H de Coninck, M. Loos, L. Meyer. 66 p.
- IPCC. 2007. Panel Intergubernamental sobre cambio climático. *Climate Change 2007: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Alley, R; Berntsen, T; Bindoff, N; Chen, Z; Chidthaisong, A; Friedlingstein, P; Gregory, J. This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007. 18 p.
- JACKSON, M.L. 1964. Análisis químico de suelos (Traducido por J. Bertrán). Barcelona, España. Ediciones Omega, S. A. 662 p.
- JANDL, R. 2001. Secuestro de carbono en bosques – El papel del suelo. Centro de Investigación Forestal. Viena, Austria. In memorias de taller internacional sobre secuestro de carbono. 9 p.

- JANSSENS, L. 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science Express*. 72:124-128.
- JOBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*. 10:423-36.
- JOOS, F. 1999. The variability in the carbon sink as reconstructed for the last 1000 years. *Geophysical Research Letters*. 26:1437-1440.
- JOOS, F. 2003. Trends in marine dissolved oxygen: implications for ocean circulation changes and the carbon budget. *EOS*. 197 p.
- KANNINEN, M. 2001. Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: Potencial para América Latina. En conferencia electrónica en potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. LEAD-CATIE.
- KAUFMANN, R. 2004. The effect of growing season and summer greenness on northern forests. *Geophysical Research Letters*. 31:346-351.
- KEELING, R.F. 1996. Global and hemispheric CO<sub>2</sub> sinks deduced from changes in atmosphere O<sub>2</sub> concentration. *Nature*. 381:218-221.
- KURSTEN, E., BURSSHEL, P. 1993. CO<sub>2</sub>-mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil. Pollution*. 70:533-544.
- LYON, T.L., BUCKMANN, H.O. 1947. Esafología. Buenos Aires, Argentina. Acmc Agency. S.R.L.

- MARENA (MINISTERIO DEL AMBIENTE Y LOS RECURSOS NATURALES). 1995. Technical summary, The Science of Climate Change, Climate Change. 43 p.
- MÁRQUEZ, L. 1997. Validación en campo de los métodos del Instituto Winrock para el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en sistemas agroforestales. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 45 p.
- MARTÍNEZ, E., VALLE, S., SILVA, P., ACEVEDO, E. 2004. Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de un suelo Mollisol asociadas a manejo en cero labranza. En: Evaluación de parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. Compendio de los trabajos presentados en la VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile. Noviembre del 2 al 14 de 2003. UNESCO, Paris. p. 95-100.
- MATA CH.R. 2003. Principios generales sobre la pedología y taxonomía de suelos. Curso de certificadores de uso conforme LEY 7776. Puntarenas, Costa Rica. 108 p.
- MEJÍA, L. 1997. Suelos del Ecuador. Reconocimiento general en base a su capacidad - fertilidad y mapa general de clasificación por capacidad - fertilidad. Quito, Ecuador. 57 p.
- MOGUEL, P., TOLEDO, V.M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*. 13(1):11-21.
- MONTENEGRO, J., ABARCA, S. 2001. Emisión de gases con efecto invernadero y fijación de carbono en el sistema de producción de café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. Boletín PROMECAFE N° 89. Tegucigalpa, Honduras. p. 9-17.

- MÜLLER, S., NÚÑEZ, J., RAMÍREZ, L. 1998. Indicadores para el uso de la tierra: el caso de la cuenca del río Reventado. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura: Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit. 41 p.
- MUÑOS, M. 2006. Dinámica del Carbono Orgánico del Suelo en Ecosistemas de la Zona Mediterránea de Chile. Para optar al Grado Académico de Doctor en Ciencias de Recursos Naturales, Temuco, Chile. p. 44-45.
- MUTUO, P.K., CADISCH, G., ALBRECHT, A., PALM, C.A., VERCHOT, L. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 71:43-54.
- NEPSTAD, D.C., UHL, C., SERRAO, E.A.S. 1991. Recuperation of a degraded Amazonian landscape: Forest recovery and agricultural restoration. *Ambio*. 20:248-255.
- OADES, J.M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*. 5:35-70.
- OELBERMANN, M., VORONEY, P.R., GORDON, M.A. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104,359-377.
- PANDEY, D.N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*. 2:367-377.
- PARTON, W.J., SCHIMEL, D.S., COLE, C.V., OJIMA, D.S. 1987. Analysis of

factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.

PNUD (PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO). 1997. Protocolo de Kyoto para la conservación Marco de las Naciones Unidas. Cambio Climático. p. 2-4.

PUGET, P., CHENU, C., BALESSENT, J. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science.* 46:449-459.

RAITSOS, D. 2005. Extending the SeaWiFS chlorophyll data set back 50 years in the northeast Atlantic, *Geophysical Research Letters*, L06603.

RAJAGOPAL, R.I. 2004. Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.

RAMÍREZ, P. 1997. Efecto invernadero guerra declarada. *Revista Forestal Centro Americana.* CATIE, Costa Rica. 19:4-42 p.

REYES, J. L, MARTÍNEZ, E., SILVA, P., ACEVEDO, E. 2002. Labranza y propiedades de un suelo aluvial de Chile central. *Boletín N° 18.* Sociedad chilena de la ciencia del suelo y Universidad de Talca. Talca, Chile. IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. p. 78-81.

ROBERT, M. 1996. *Le Sol: Interface Dans L'environnement, Ressource pour le Développement.* Dunod/Masson. Paris. 240 p.

- ROBERT, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos. FAO. Roma, IT. N° 96. 61 p.
- SABINE, C. 2004. The Oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*. 305:367-371.
- SÁNCHEZ, P.A., PALM, C.A., DAVEY, C.B., SZOTT, L.T., RUSSELL, C.E. 1985. Tree crops as soil improvers in the humid tropics? In Cannell, M.G; Jackson, J.E (eds.) *Attributes of Trees as Crop Plants*. Huntingdon, England. Institute of Terrestrial Ecology. Natural Environmental Research Council. p. 327-350.
- SCHIMEL, D.S., HOUSE, J.I., BOUSQUET, K.A., CIAIS, P., PEYLIN, P., BRASWELL, B.H., APPS, B.J., BEKER, D., BONDEAU, A., CANADELL, J., CHURQUINA, G., CRAMAER, W., DENNING, A.S., FIELD, C.B. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbón of sxhange by terrestrial ecosystems. *Nature*. 414:169-172.
- SCHROEDER, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27,89–97.
- SCHROTH, G., LEHMANN, J., RODRIGUEZ, M. R., BARROS, E., MACEDO, J.L. 2001. Plant–soil interactions in multi state agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*. 53(2):85–102.
- SEGURA, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Catie, Turrialba. Costa Rica. 120 p.

- SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., DENEFF., K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Res.* 79:7-31.
- SOMARRIBA, E., HARVEY, C.A., SAMPER, M., ANTHONY, F., GONZÁLEZ, J., STAVER, C., RICE, R.A. 2004. Biodiversity conservation in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations. *In: Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes.* Ed. por G. Schroth, G.A.B. da Fonseca, C.A. Harvey, C. Gascon, H.L. Vasconcelos, A.M.N. Izac. Washington, DC. Island Press. p. 198-226.
- STEVENSON, F.J. 1994. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions.* New York, NY. John Wiley and Sons.
- THENG, B.K.G., TATE, K.R., SOLLINS, P. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. *In: Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems.* Ed. por D.C.Coleman, J.M. Oades, G. Uehara. Manoa, Hawaii. Niftal Project. p. 5-31.
- TRUMBMORE, S.E., DAVIDSON, E.A., P., NEPSTAD, D.D., MARTINELLI, L.A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles:* [En línea]: FAO, (<http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s05.htm>; 10 Oct. 2015).
- VITOUSEK, P.M. 1994. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology.* 75:1861-1876.
- YOUNG, A. 1997. *Agroforestry for soil management.* 2 ed. UK. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF).

**ANEXO**

## Anexo 1. Estadística descriptiva de la investigación.

Cuadro 14. Estadística descriptiva.

SUT	Estrato o profundidad	Variable	Media	E.E.
CBS	E1	pH	5.41	0.31
CBS	E1	MO	4.43	0.29
CBS	E1	N	0.20	0.01
CBS	E1	P	9.00	1.85
CBS	E1	K <sub>2</sub> O	338.99	42.87
CBS	E1	Dap	1.57	0.07
CBS	E1	COS	40.15	3.04
CBS	E2	pH	5.81	0.20
CBS	E2	MO	2.61	0.27
CBS	E2	N	0.12	0.01
CBS	E2	P	11.00	4.76
CBS	E2	K <sub>2</sub> O	433.74	67.90
CBS	E2	Dap	1.37	0.03
CBS	E2	COS	20.61	1.84
CBS	E3	pH	5.32	0.12
CBS	E3	MO	2.56	0.37
CBS	E3	N	0.12	0.02
CBS	E3	P	16.81	5.57
CBS	E3	K <sub>2</sub> O	428.22	42.50
CBS	E3	Dap	1.38	0.08
CBS	E3	COS	20.53	3.14
CSS	E1	pH	5.53	0.25
CSS	E1	MO	4.08	0.32
CSS	E1	N	0.18	0.01
CSS	E1	P	11.93	4.64
CSS	E1	K <sub>2</sub> O	389.44	64.50
CSS	E1	Dap	1.51	0.05
CSS	E1	COS	35.89	3.30
CSS	E2	pH	5.52	0.17

---

CSS	E2	MO	2.93	0.45
CSS	E2	N	0.13	0.02
CSS	E2	P	21.71	8.52
CSS	E2	K <sub>2</sub> O	290.03	83.36
CSS	E2	Dap	1.57	0.04
CSS	E2	COS	26.15	3.57
CSS	E3	pH	4.95	0.10
CSS	E3	MO	1.08	0.16
CSS	E3	N	0.05	0.01
CSS	E3	P	11.68	5.52
CSS	E3	K <sub>2</sub> O	377.86	86.09
CSS	E3	Dap	1.51	0.06
CSS	E3	COS	9.50	1.44
SSP	E1	pH	4.93	0.25
SSP	E1	MO	1.86	0.08
SSP	E1	N	0.16	0.01
SSP	E1	P	8.64	0.40
SSP	E1	K <sub>2</sub> O	324.70	17.98
SSP	E1	Dap	1.42	0.09
SSP	E1	COS	15.21	0.74
SSP	E2	pH	4.81	0.12
SSP	E2	MO	1.65	0.07
SSP	E2	N	0.08	0.01
SSP	E2	P	9.21	0.64
SSP	E2	K <sub>2</sub> O	330.27	45.85
SSP	E2	Dap	1.57	0.09
SSP	E2	COS	15.00	1.28
SSP	E3	pH	4.51	0.10
SSP	E3	MO	1.19	0.16
SSP	E3	N	0.05	0.00
SSP	E3	P	7.68	0.73
SSP	E3	K <sub>2</sub> O	236.12	12.69
SSP	E3	Dap	1.48	0.11
SSP	E3	COS	10.21	1.53

---

## Anexo 2. Análisis físico químico de suelos.



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Laboratorio de Análisis de Suelos

"Año de la Diversificación Productiva y del Fortalecimiento de la Educación"

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE SUELOS

SOLICITANTE : Bach. NIETO MONTECILLO, Jimmy Jhonatan  
 LUGAR : Sector Víctor Andrés Belaunde, distrito Nuevo Progreso  
 FECHA : 25-01-2015

N°	SUT	Est.	pH	M.O	N	P	K2O	D. ap.	N°	SUT	Est.	pH	M.O	N	P	K2O	D. ap.
			01:01	%	%	ppm	kg/ha	(g.cm-3)				01:01	%	%	ppm	kg/ha	(g.cm-3)
1	C.B.S	E1	6.25	5.76	0.26	3.87	401.49	1.6	28	C.S.S	E2	5.39	4.27	0.19	5.1	113.96	1.45
2	C.B.S	E1	4.57	4.16	0.19	9.25	290.19	1.54	29	C.S.S	E2	5.54	1.12	0.05	30.33	79.37	1.77
3	C.B.S	E1	4.61	4.48	0.2	8.6	416.07	1.65	30	C.S.S	E2	4.95	3.36	0.15	56.88	178.88	1.53
4	C.B.S	E1	5.02	3.84	0.17	4.3	192.13	1.53	31	C.S.S	E3	4.9	1.12	0.05	2.59	599.32	1.75
5	C.B.S	E1	5.98	4.48	0.2	15.49	466.42	1.28	32	C.S.S	E3	4.66	1.68	0.08	9.53	202.73	1.5
6	C.B.S	E1	6.02	3.84	0.17	12.48	267.66	1.8	33	C.S.S	E3	4.95	0.84	0.04	6.39	194.78	1.34
7	C.B.S	E2	6.4	3.52	0.16	33.98	699.63	1.23	34	C.S.S	E3	5.22	1.01	0.05	2.2	204.72	1.44
8	C.B.S	E2	5.96	1.92	0.09	8.17	306.09	1.38	35	C.S.S	E3	4.73	0.56	0.03	11.09	657.49	1.54
9	C.B.S	E2	5.09	1.92	0.09	2.15	430.64	1.37	36	C.S.S	E3	5.21	1.28	0.06	38.29	408.12	1.49
10	C.B.S	E2	6.3	2.56	0.12	4.09	280.91	1.42	37	SSP	E1	4.36	1.75	0.18	7.54	302.32	1.59
11	C.B.S	E2	5.55	3.2	0.14	10.75	324.64	1.38	38	SSP	E1	4.38	1.56	0.18	8.32	344.63	1.61
12	C.B.S	E2	5.57	2.56	0.12	6.88	560.5	1.43	39	SSP	E1	5.44	1.98	0.13	8.94	268.35	1.12
13	C.B.S	E3	5.56	3.2	0.14	3.01	339.22	1.62	40	SSP	E1	5.73	2.10	0.18	8.24	388.52	1.42
14	C.B.S	E3	5.42	2.56	0.12	3.87	610.85	1.28	41	SSP	E1	5.25	2.00	0.14	8.35	349.95	1.17
15	C.B.S	E3	4.97	3.84	0.17	21.08	429.32	1.22	42	SSP	E1	4.43	1.78	0.12	10.43	294.43	1.63
16	C.B.S	E3	5.72	1.92	0.09	38.29	323.31	1.17	43	SSP	E2	4.64	1.56	0.12	8.47	202.06	1.5
17	C.B.S	E3	4.99	1.28	0.06	24.09	402.82	1.45	44	SSP	E2	4.34	1.64	0.05	8.46	304.01	1.64
18	C.B.S	E3	5.27	2.56	0.12	10.54	463.77	1.56	45	SSP	E2	5.14	1.94	0.06	11.86	486.22	1.77
19	C.S.S	E1	4.76	4.48	0.2	3.87	347.17	1.77	46	SSP	E2	4.73	1.56	0.09	7.93	259.46	1.85
20	C.S.S	E1	6.02	3.84	0.17	12.48	267.66	1.47	47	SSP	E2	4.92	1.74	0.09	8.11	280.66	1.32
21	C.S.S	E1	5.13	4.7	0.21	5.48	534	1.49	48	SSP	E2	5.06	1.43	0.05	10.42	449.21	1.31
22	C.S.S	E1	6.44	3.36	0.15	34.18	161.66	1.45	49	SSP	E3	4.3	0.89	0.06	7.37	246.53	1.82
23	C.S.S	E1	5.44	3.08	0.14	5.5	562.22	1.45	50	SSP	E3	4.44	0.78	0.05	7.92	224.49	1.22
24	C.S.S	E1	5.38	5.04	0.23	10.08	463.9	1.43	51	SSP	E3	4.73	1.86	0.05	5.53	286.95	1.57
25	C.S.S	E2	5.53	3.08	0.14	27.42	398.84	1.57	52	SSP	E3	4.6	1.21	0.05	8.92	213.96	1.49
26	C.S.S	E2	5.45	3.5	0.16	8.07	355.78	1.53	53	SSP	E3	4.2	1.08	0.05	10.32	246.25	1.64
27	C.S.S	E2	6.24	2.24	0.1	2.47	613.37	1.58	54	SSP	E3	4.8	1.32	0.05	6.04	198.56	1.13

C.B.S.: Café bajo sombra; C.S.S: Café sin sombra; SSP: Sistema silvopastoril ; Est.: Estrato.

Nota: Muestras Proporcionaladas por el interesado.



Ing° José D. Lévano Crisóstomo  
 Jefe del Laboratorio de Suelos

C.c

Anexo 3. Mapas del campo experimental.

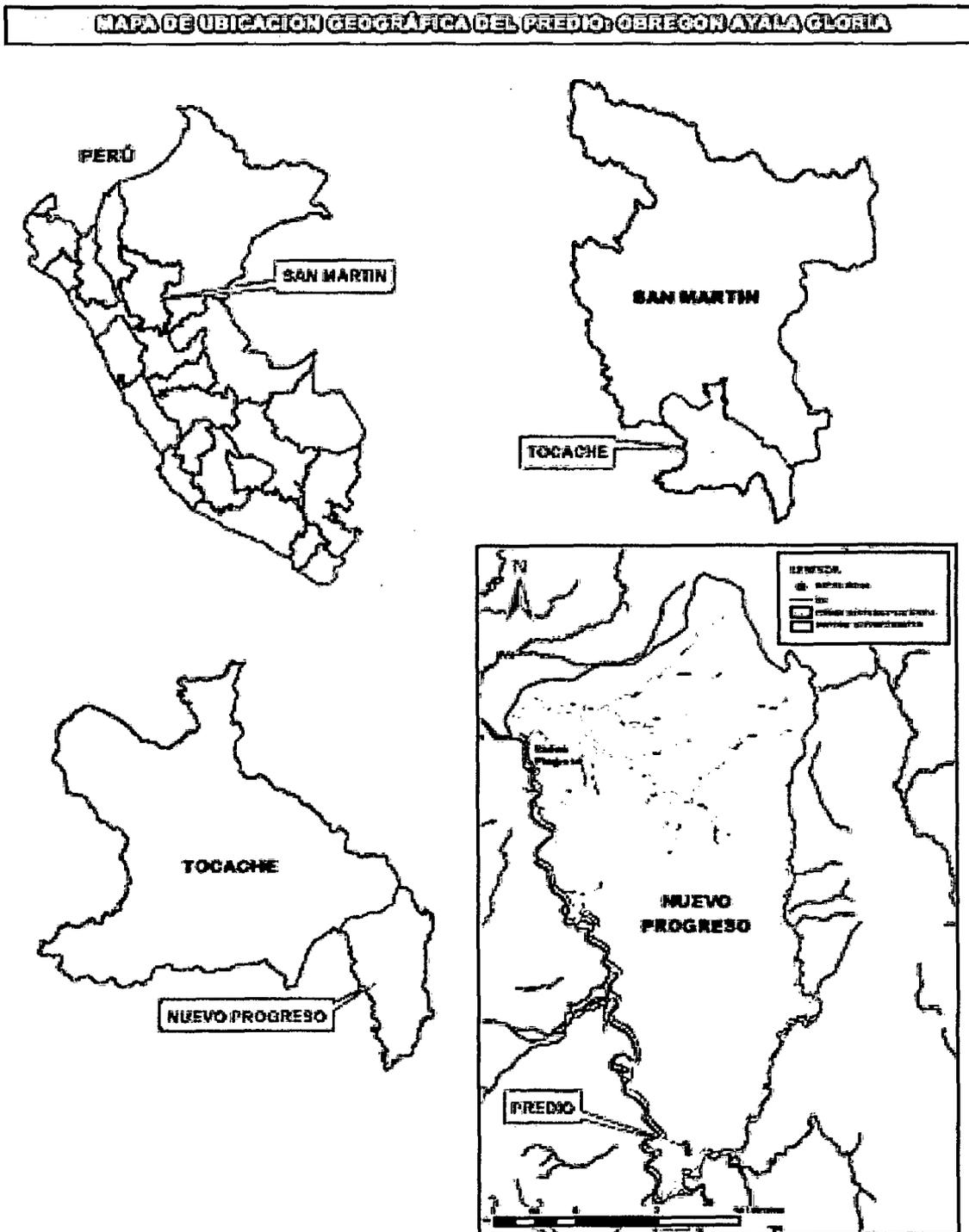


Figura 17. Mapa de ubicación geográfica del predio.

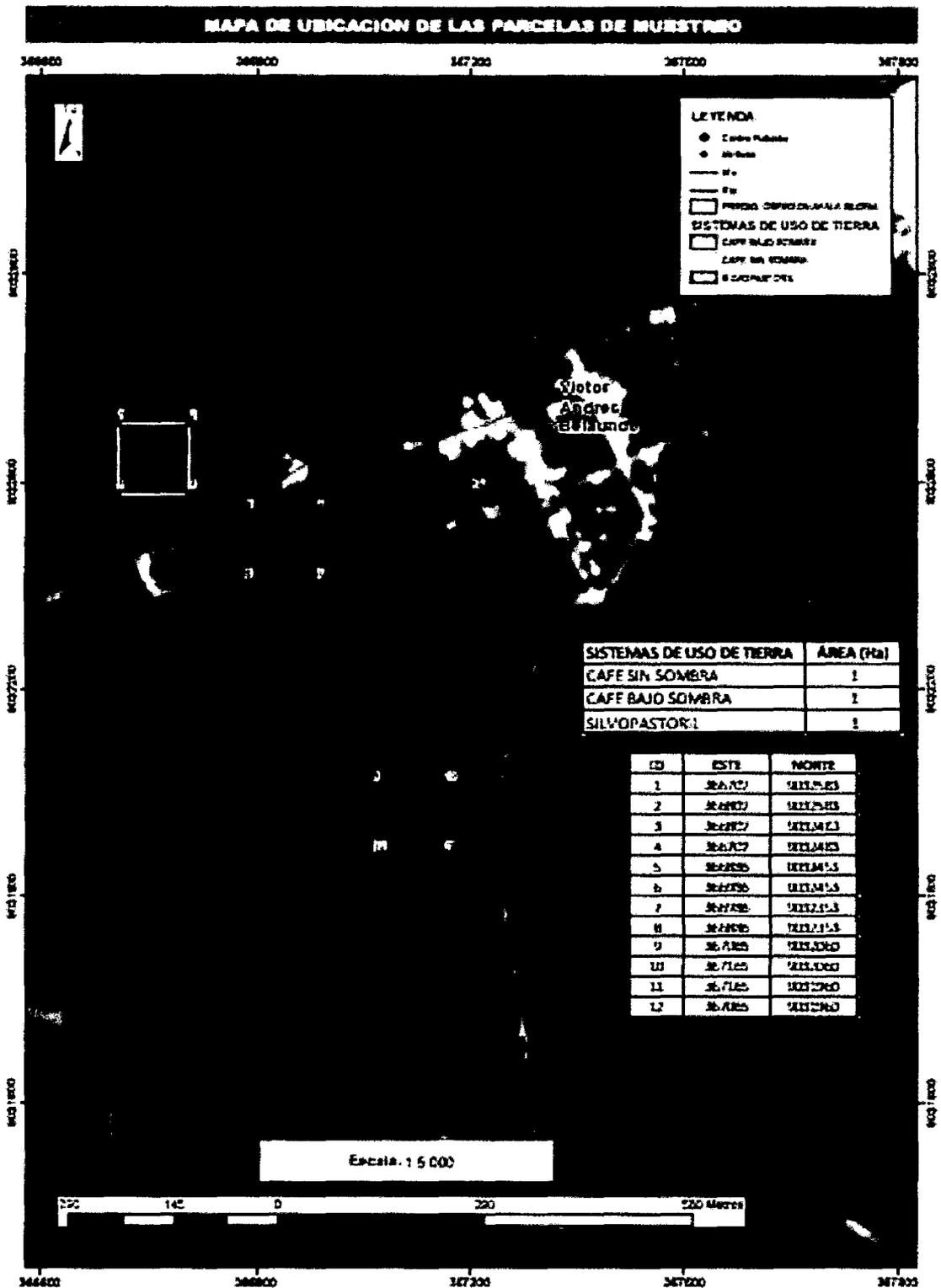


Figura 18. Mapa de ubicación de las parcelas de muestreo.

Anexo 4. Panel fotográfico.



Figura 19. Sistema bajo sombra de guaba<sub>1</sub> (CBS).



Figura 20. Sistema bajo sombra de guaba<sub>2</sub> (CBS).



Figura 21. Sistema café sin sombra<sub>1</sub> (CSS).

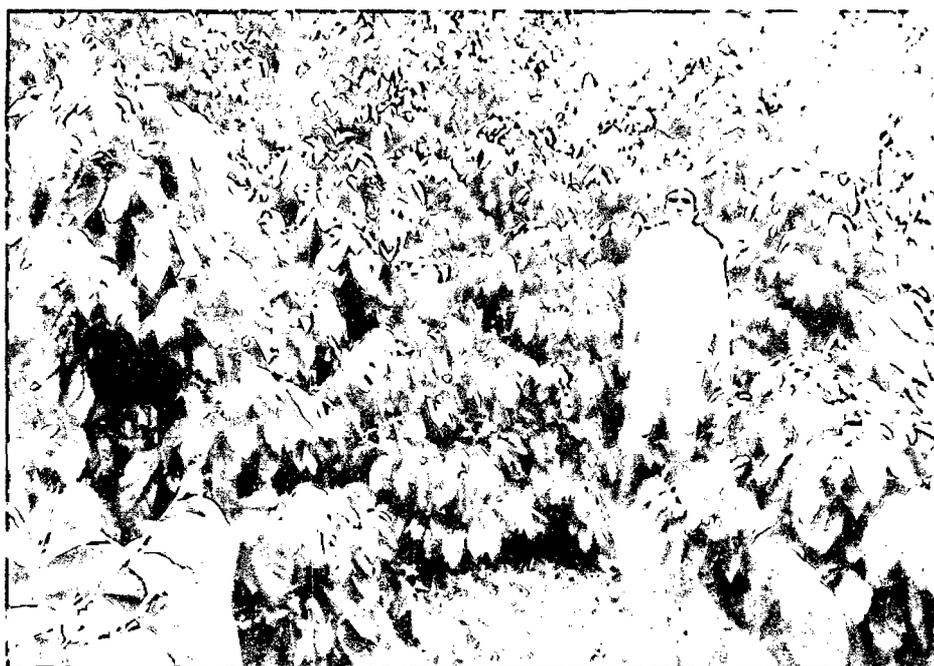


Figura 22. Sistema café sin sombra<sub>2</sub> (CSS).



Figura 23. Sistema silvopastoril<sub>1</sub> (SSP).



Figura 24. Sistema silvopastoril<sub>2</sub> (SSP).



Figura 25. Muestreo del suelo del sistema CBS.

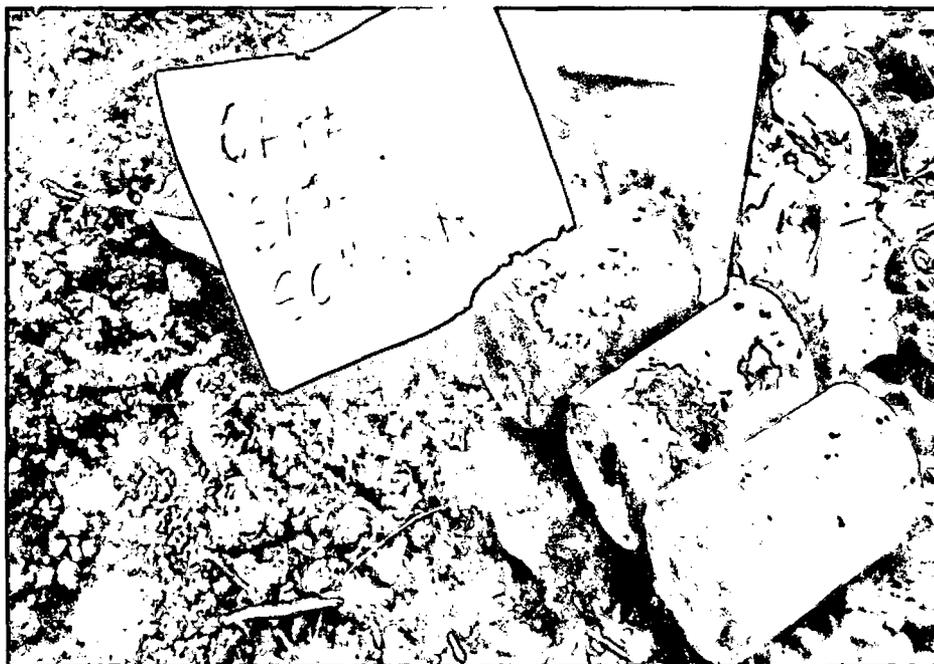


Figura 26. Muestras de suelo del sistema CBS para determinación del COS.



Figura 27. Muestreo del suelo del sistema CSS.

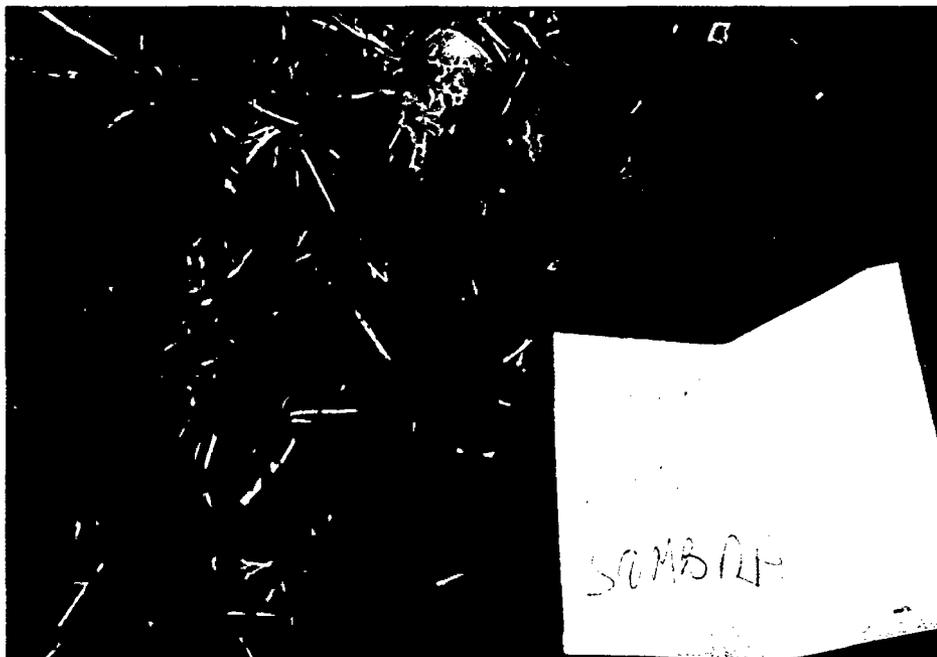


Figura 28. Muestras de suelo del sistema CSS para determinación del COS.



Figura 29. Muestreo del suelo del sistema SSP.



Figura 30. Muestras de suelo del sistema SSP para determinación del COS.