

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**



**“FRACCIONES DEL CARBONO ORGÁNICO LÁBIL EN
SUELOS DE LA AMAZONIA PERUANA BAJO
DIVERSOS SISTEMAS DE USO”**

**Presentada por:
CEILA PAQUITA LAO OLIVARES**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
SUELOS**

Lima - Perú

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**

**“FRACCIONES DEL CARBONO ORGÁNICO LÁBIL EN
SUELOS DE LA AMAZONIA PERUANA BAJO
DIVERSOS SISTEMAS DE USO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

CEILA PAQUITA LAO OLIVARES

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

**Dr. Oscar Loli Figueroa
PRESIDENTE**

**Dr. Julio César Alegre Orihuela
PATROCINADOR**

**Dr. Sady Javier García Bendezú
MIEMBRO**

**Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO**

DEDICATORIA

*A mis padres Juan y Rosa Elena:
Por el ejemplo de perseverancia y fortaleza,
sus consejos y amor siempre serán mi guía.*

*A mi esposo, José Miguel:
Por ser mi mayor motivo para seguir adelante,
tu apoyo es crucial en cada paso de mi vida.*

*A mis hermanos, Mey Lin, Juan Daniel y Rosa Elena:
sin ustedes mis logros no tienen sentido.*

*A Jimmy, Angela y Ruby,
Por nuestra amistad construida “con los pies sobre el suelo.”*

*A Joaquín Alejandro,
Aunque el proyecto empezó cuando aún no sabía de ti,
ahora te has convertido en todo para mí.*

Agradecimiento

Este trabajo de investigación se realizó gracias al apoyo de muchas personas:

Al Dr. Julio Alegre y al Dr. Sady García, por asesorarme y motivarme durante todo el proceso del trabajo de investigación, gracias por la dedicación a este trabajo.

A mi maestra y amiga Ing. MSc. Ruby Vega por las enseñanzas brindadas y el apoyo incondicional en el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Oscar Loli y al Ing. MSc. Braulio La Torre, por asesorarme y ayudarme en aclarar las dudas durante el proceso de la investigación.

A los socios estratégicos del proyecto VLIR-UNALM: INIA, IIAP y UNAP; por brindarme el apoyo logístico durante la fase de campo.

A Ximena Tagle, Gabriela Castañeda, Kevin Pérez y Linda Estrada, tesistas del proyecto VLIR – UNALM subproyecto Sistemas Agroforestales, por el apoyo en el trabajo de campo y gabinete

Al técnico de campo, Sr. William Gárate, por ayudarme en el trabajo de campo y muestreo de suelos.

A Henry Castañeda, por su apoyo incondicional en las evaluaciones de biomasa microbiana y carbono oxidable en permanganato.

A Wendy Pérez, por el apoyo en la elaboración de los protocolos para la evaluación de fracciones de carbono.

A Jesús Gutiérrez, por el apoyo en la parte logística y de documentación en el proceso de la tesis.

A Raquel Quispe, por el apoyo en la recopilación de información.

Al personal del Laboratorio de Suelos, por el apoyo en el procesamiento y análisis de las muestras de suelos, gracias por acogerme en sus instalaciones.

A la gran familia del Departamento Académico de Suelos, por las enseñanzas y amistad, gracias por ser mi mayor referente de conocimientos.

Índice

RESUMEN.....	1
1. Introducción	2
2.1. Carbono del suelo	4
2.1.1. Carbono lábil del suelo	5
2.2. Fraccionamiento del carbono lábil del suelo.....	7
2.2.1. Biomasa microbiana del suelo	8
2.2.2. Carbono orgánico disuelto (COD).....	9
2.2.3. Carbono oxidable en permanganato (COXP)	11
2.2.4. Materia orgánica particulada (MOP)	13
2.3. Sistemas agroecológicos utilizados en la Amazonia peruana.....	14
2.3.1. Sistema multiestratos	14
2.3.2. Sistema de pasturas	15
2.3.3. Sistema de producción de pijuayo (<i>Bactris gasipae</i>).....	15
2.3.4. Sistema de producción de palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>)	16
3. Materiales y métodos	17
3.1. Ámbito de estudio.....	17
3.1.1. Localización del ámbito de estudio.....	17
3.2. Características generales del área de estudio	19
3.3. Metodología.....	21
3.3.1 Descripción de las unidades de muestreo	21
3.3.2. Muestreo de suelos	24
3.3.3 Análisis de las fracciones de carbono.....	24
3.4. Análisis estadístico	32
4. Resultados	33
4.1. Contenido de fracciones de carbono orgánico en los sistemas de uso de suelo evaluados.	33
4.3. Proporción de fracciones en función del carbono orgánico total del suelo.	36
5. Discusión.....	39
5.1. Contenido de fracciones de carbono orgánico en los SUT evaluados.....	39
5.2. Análisis de clúster de la relación entre los sistemas de usos de suelo evaluados en función a sus fracciones de carbono orgánico	43
5.3. Proporción de fracciones en función del carbono orgánico total del suelo.	44
6. Conclusiones	46
7. Recomendaciones.....	47
8. Referencias bibliográficas	48

Índice de cuadros

Cuadro 1: Reservas de carbono en los suelos del mundo	5
Cuadro 2: Indicadores de la calidad del suelo.	7
Cuadro 3: Liberación de carbono orgánico extractable de la biomasa microbiana en dos tipos de rotación del suelo.	9
Cuadro 4: Coordenadas y altitud sobre el nivel del mar de los diez sistemas evaluados ..	17
Cuadro 5: Antecedentes de los sistemas de uso del suelo (SUS) evaluados.....	22
Cuadro 6: Características de los sistemas de uso del suelo (SUS) evaluados.....	23
Cuadro 7: Número de muestras obtenidas por cada sistema de uso del suelo.	24
Cuadro 8: Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas evaluados a los 15 cm de profundidad.....	25
Cuadro 9: Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas evaluados de 15 a 30 cm de profundidad.	26

Índice de figuras

Figura 1: Fraccionamiento representativo del carbono del suelo.....	8
Figura 2: Modelo conceptual del proceso de mineralización del carbono: MOS, materia orgánica del suelo; MOD, materia orgánica disuelta; BM, biomasa microbiana.....	11
Figura 3: Mapa de ubicación de los sistemas evaluados	18
Figura 4: Climograma de la zona de estudio.....	19
Figura 5: Boxplot de las concentraciones de biomasa microbiana en los sistemas de uso de suelo evaluados.	33
Figura 6: Boxplot de las concentraciones de carbono orgánico soluble en los sistemas de uso de suelos evaluados.....	34
Figura 7: Bloxpot de las concentraciones de materia orgánica particulada en los sistemas de uso de suelos evaluados.	34
Figura 8: Boxplot de las concentraciones de carbono oxidable en permanganato en los sistemas de uso de suelo.	35
Figura 9: Análisis de clúster para las fracciones de carbono orgánico lábil y los sistemas de uso de suelo evaluados.....	36
Figura 10: Porcentajes de concentraciones de fracciones lábiles de carbono orgánico en relación al carbono orgánico total del suelo.	38

Índice de anexo

Anexo 1: Base de datos de las fracciones de carbono orgánico lábil.....	65
Anexo 2: Fotografías de los diez sistemas de uso de suelos evaluados.....	69
Anexo 3: Fotografías del muestreo de suelos y análisis en el laboratorio de suelos.....	74

Lista de acrónimos

MOS: Materia orgánica del suelo

COT: Carbono orgánico total

COS: Carbono orgánico del suelo

COD: Carbono orgánico soluble

MOP: Materia orgánica particulada

BMS: Biomasa microbiana del suelo

COXP: Carbono orgánico oxidable en permanganato

CLS: Carbono lábil del suelo

IRC: Índice de reserva del carbono

MACO: Minerales asociados al carbono orgánico

CSAC: Carbono soluble en agua caliente

SUT: Sistemas de usos de la tierra

MOD: Materia orgánica disuelta

SAF: Sistema Agroforestal

IIAP: Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana

INGEMMET: Instituto Geológico Minero Metalúrgico

INIA: Instituto Nacional de Investigación de la Amazonía

MINAM: Ministerio del Ambiente

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

PRC: Parcela de recorte cuadrangular

SUT: Sistema de Uso de Tierra

UNALM: Universidad Nacional Agraria La Molina

UNAP: Universidad de la Amazonia Peruana

USDA: United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de Estados Unidos)



El presente trabajo de investigación forma parte del **Programa de Cooperación Belga VLIR-UNALM**, PROYECTO 1: Investigación en Sistemas Agrarios, Subproyecto 1: Sistemas Agroforestales.

RESUMEN

Durante la última década, el análisis de fracciones físicas y químicas de la materia orgánica del suelo han tomado mayor relevancia debido a sus diferentes tasas de mineralización. El análisis de la materia orgánica disuelta, la materia orgánica particulada y las fracciones activas del carbono son actualmente incluidos en estudios sobre composición y dinámica del carbono en suelos bajo sistemas productivos. Con el objetivo de describir la influencia del uso del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico lábil bajo diversos sistemas en la Amazonia Peruana, se muestreó suelo en época seca de diez sistemas productivos en la provincia de Alto Amazonas, Loreto, Perú. Para el análisis de las fracciones de carbono se tomaron los métodos descritos por Blair et al. (1995) y Weil et al. (2003), para carbono oxidable en permanganato, la técnica de fumigación/extracción de Jenkinson y Powlson (1976), para la determinación de biomasa microbiana, el método de carbono soluble en agua caliente descrito por Ghani y Dexter (2003), para carbono orgánico disuelto y el método descrito por Cambardella y Elliot (1992), para la determinación de materia orgánica particulada.

Los resultados obtenidos nos muestran que el carbono contenido en la biomasa microbiana del suelo fue mayor en el sistema multiestratos, siendo dependiente de la presencia de arcilla en el suelo, el mayor contenido del carbono oxidable en permanganato del suelo resultó en el sistema con pijuayo asociado con cobertura de kudzu, siendo esta fracción más abundante en los sistemas asociados a coberturas vegetales, el sistema de bosque primario fue el que mayor contenido de carbono orgánico disuelto, así como del contenido de materia orgánica particulada, las cuales son de mayor concentración en sistemas más conservados y con diversidad vegetativa.

Finalmente se concluye que el buen manejo del suelo contribuye a conservar las fracciones de carbono orgánico lábil del suelo, el cual se ve reflejado en los sistemas multiestratos 1 y bosque primario y la materia orgánica particulada es la fracción con mayor cantidad en todos los sistemas evaluados en función al carbono total del suelo.

Palabras claves: Biomasa microbiana, carbono oxidable en permanganato, carbono orgánico disuelto y materia orgánica particulada

1. Introducción

La extrema sensibilidad del carbono orgánico del suelo en el cambio de uso de tierra hace que en la actualidad sea objeto de nuevas investigaciones en diferentes ecosistemas terrestres (Huygens et al., 2005). Durante muchas décadas, el contenido de carbono orgánico total fue considerado como un parámetro suficiente para entender la dinámica de este elemento en el suelo, sin embargo en años recientes, el análisis de fracciones físicas y químicas ha tomado mayor relevancia debido a las diferentes tasas de mineralización. El análisis de la materia orgánica disuelta (Zsolnay, 2003), la materia orgánica particulada (Elliott y Cambardella, 1991; Cambardella y Elliott, 1992) y las fracciones activas del carbono (Blair et al., 1995) son actualmente incluidos en estudios sobre composición y dinámica del carbono en suelos bajo sistemas productivos. Las prácticas de manejo en el suelo, usualmente causan cambios mínimos en el contenido del carbono total del suelo medidos a corto plazo, por su gran complejidad (Prasad Datta et al., 2010). Los suelos contienen compuestos complejos y heterogéneos que derivan de los diferentes materiales orgánicos que pueden ser divididos en fracciones o pools de carbono lábil y recalcitrante, diferenciados sobre la base de las tasas de descomposición, la dinámica del carbono del suelo está en gran parte controlada por la alta bioreactividad de las fracciones de carbono lábil (Adisa y Nortcliff, 2010).

La información acumulada sobre la calidad del carbono orgánico y sus fracciones en suelos tropicales de la Amazonia Peruana aún es limitada; especialmente en relación a la mineralización y sus funciones en el suelo. Conocer las fracciones de carbono orgánico lábil nos permite identificar el tipo de materia orgánica con que se cuenta y adicionalmente definir si la mayor concentración de estas fracciones indica el buen manejo del suelo y en consecuencia la menor degradación del sistema productivo.

La hipótesis descriptiva planteada para esta investigación es que el manejo de los sistemas productivos en función al suelo permite la mejor conservación de las fracciones de carbono orgánico lábil en la Amazonia Peruana.

El objetivo general que se espera lograr con este trabajo de investigación es describir la influencia del uso del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico lábil bajo diversos sistemas en la Amazonia Peruana.

Los objetivos específicos son:

- Determinar los efectos del uso de suelo sobre las cuatro fracciones de carbono orgánico lábil en la Amazonia Peruana.
- Identificar mediante un análisis de clúster la relación de los sistemas de usos del suelo en función a las fracciones de carbono orgánico lábil en la Amazonia Peruana.
- Determinar el contenido proporcional de fracciones de carbono orgánico lábil en cada uno de los diferentes usos del suelo en la Amazonia Peruana.

2. Revisión de literatura

2.1. Carbono del suelo

El carbono puede aparecer en el suelo bajo dos formas: inorgánica y orgánica. El carbono inorgánico deriva de las rocas o del CO₂ atrapado en su forma mineral (carbonato de calcio); el carbono inorgánico es menos propenso a la pérdida que el carbono orgánico, a pesar de que puede disolverse bajo condiciones de acidez el carbono inorgánico del suelo no es susceptible a la biodegradación.

El carbono orgánico del suelo es el principal constituyente de la materia orgánica del suelo (MOS). La MOS está formada por la descomposición física, química y biológica de materiales orgánicos que entran al sistema suelo (hojas caídas, residuos de cultivos, desechos de animales) o que están dentro del suelo (raíces y biota del suelo). La composición elemental de la MOS en promedio tiene 50 % de carbono (Broadbert, 1953), 40 % de oxígeno y 3 % de nitrógeno, con pequeñas cantidades de fósforo, potasio, calcio, magnesio y otros elementos como micronutrientes. La biota del suelo (considerando microorganismos y gusanos de tierra) contribuye a la biomasa viviente de la MOS, mezclando e incorporando la materia orgánica a través de procesos físicos y reacciones químicas, que liberan carbono y nutrientes que regresan al suelo (UNEP, 2012). La dinámica del carbono orgánico está principalmente influenciada por su estado recalcitrante y disponibilidad para los microorganismos del suelo (Huygens et al., 2005).

El carbono orgánico total (COT) tiene un rol importante en mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Más aún el COT del suelo es una variable ambiental importante, debido a su función de reservorio de carbono de la superficie de la Tierra. La adición de residuos de cultivos, junto con el mantenimiento de la estructura del suelo, resulta en el incremento de los minerales asociados al carbono orgánico, un parámetro que refleja la relación entre el carbono y la fracción de limo más arcilla. (Sá et al., 2011)

Los suelos de la Amazonia Peruana son clasificados dentro de los órdenes de Ultisoles, Inceptisoles, Entisoles e Histosoles (Tyler y Buol, 1978; Torres, 2012), los cuales tienen cantidades entre medias y bajas de carbono orgánico del suelo (a excepción de los histosoles, que tienen altos contenidos de carbono orgánico). El

Cuadro 1 describe la cantidad de carbono orgánico según la clasificación del suelo.

Cuadro 1: Reservas de carbono en los suelos del mundo

Orden /Tipo de suelo	Área (Mha)	Carbono orgánico del suelo		Carbono inorgánico del suelo	
		Contenido (t/ha)	Reserva (Pg)	Contenido (t/ha)	Reserva (Pg)
Alfisolos	1262	125	158	34	43
Andisoles	91	220	20	0	0
Aridisoles	1570	38	59	290	456
Entisoles	2114	42	90	124	263
Gelisoles	1126	281	316	6	7
Histosoles	153	1170	179	0	0
Inceptisoles	1286	148	190	26	34
Mollisoles	901	134	121	96	116
Oxisoles	981	128	126	0	0
Suelo rocosa	1308	17	22	0	0
Arenas movedizas	532	4	2	9	5
Espodosoles	335	191	64	0	0
Ultisoles	1105	124	137	0	0
Vertisoles	316	133	42	50	21
Total	13083	-	1526	-	945

FUENTE: Lal, 2004.

De forma general los cambios en el carbono orgánico del suelo, indican que después del cambio de tierra de bosque primario a pasturas este se incrementa en 8 % (basado en 170 observaciones), pero disminuyen después del cambio de pastura a cultivos en 10 % (basados en 83 observaciones; Huygens et al., 2005)

2.1.1. Carbono lábil del suelo

La fuente de MOS con tamaño más pequeño y descomposición más rápida es llamada lábil. La labilidad de la MOS es definida como la rapidez y facilidad con la cual es descompuesta

por los microorganismos y depende de la protección física y a nivel químico de su comportamiento recalcitrante (Krull et al., 2003; citado por McLauchan y Hobbie, 2004).

La fuente activa de la MOS consiste en materiales lábiles (de fácil descomposición) con vida de sólo pocos días a unos pocos años. La MOS en su fuente activa, incluye fracciones de biomasa viviente, materia orgánica particulada, la mayoría de polisacáridos y otras sustancias no húmicas. Esta fuente activa provee la mayoría del alimento rápidamente accesible para los organismos del suelo y la mayor cantidad de nitrógeno rápidamente mineralizable, es responsable de la mayoría de los efectos benéficos sobre la estabilidad estructural que logra mejorar la infiltración del agua y resistencia a la erosión. Esta fuente activa puede ser rápidamente incrementada por la adición de residuos de plantas y animales, pero también de forma rápida cuando sus adiciones son reducidas o hay labranza intensiva, esta fuente raramente supera el 10 % al 20 % de la MOS total. El manejo productivo de suelos orientados con prácticas de conservación contiene relativamente cantidades altas de fracciones de MOS asociadas con la fuente activa, incluyendo BMS, MOP y azúcares oxidables (Brady, 2008).

Cuanto más lábil sea una materia orgánica incorporada al suelo más rápida será su contribución energética a los organismos del ecosistema (Porta, 2003).

La fuente de carbono lábil no puede ser determinada usando métodos con ^{14}C , tiene tiempo de residencia más corto y en su composición se encuentran sustancias del suelo que se pueden identificar como aminoácidos, péptidos, enzimas activas, ácidos orgánicos, carbohidratos, lípidos, surfactantes, sideróforos, vitaminas, factores de crecimiento, agentes de autoinducción. Los compuestos de esta fuente de carbono tienen una alta actividad pero que es corta en el tiempo (Zimmermann et al., 2007).

2.1.1.1. Indicadores de calidad del suelo

Se han desarrollado investigaciones para determinar indicadores confiables de la calidad del suelo. Learson y Pierce (1991), proponen el concepto de “Grupo mínimo de datos” (MDS por sus siglas en inglés) el que puede ser usado para evaluar el suelo. Este grupo considera indicadores sensibles al manejo del suelo y así determinar de forma rápida la calidad del suelo, con metodologías estándares y sencillas; una combinación de indicadores físicos, químicos y biológicos donde se considera la labilidad del carbono orgánico del suelo (Cuadro 2).

Cuadro 2: Indicadores de la calidad del suelo propuestos por Larson y Pierce (1991), incluyendo al carbono orgánico lábil.

Indicadores de calidad del suelo
Disponibilidad de nutrientes
Carbono orgánico total
Carbono orgánico lábil
Textura
Capacidad de almacenamiento de agua disponible para la planta
Estructura del suelo
Resistencia del suelo a la compactación
Profundidad máxima de raíces
pH
Conductividad eléctrica

2.2. Fraccionamiento del carbono lábil del suelo

Una forma de fraccionar la MOS de forma simple es usando agua destilada o desionizada, para separar la materia orgánica soluble que es fuente de carbono fácilmente degradable (Chantigny, 2003). La extracción con agua caliente fue propuesta primero por Keeney y Bremner (1996), para determinar el nitrógeno fácilmente disponible del suelo y desde ahí fue aplicado para separar el carbono lábil (Haynes, 2005). EL COS extraído en agua caliente está constituido por muchos carbohidratos y aminoácidos lábiles (Leinweber et al., 1995) y es básicamente de origen microbiano (Sparling et al., 1998).

Blair et al., (1995) sugiere que la fracción de carbono orgánico oxidable en permanganato de potasio (KMnO_4) es útil como un índice de COS lábil. Tirol-Padre y Ladha (2004) encontraron mejores correlaciones entre el carbono orgánico oxidable en permanganato de potasio (COXP) y el COS total que con el carbono soluble en agua y el carbono de la biomasa microbiana del suelo. Skjemstad et al., (2006) también compararon el método para la materia orgánica particulada (MOP) y encontró que el COXP fue relativamente insensible a la ganancia rápida de COS, lo cual es contrario a la definición de fuente de carbono lábil. Ambos estudios determinaron que este método es sensible a la presencia de lignina y concluye que se debe tomar con cautela el relacionar el COXP para el COS lábil. En la Figura 1: Fraccionamiento representativo del carbono del suelo (Zimmermann et al., 2007), se describe el fraccionamiento del carbono del suelo en función a la estabilidad. Las fracciones

menores a $0.45 \mu\text{m}$ son consideradas como lábil, las que están en el rango de 0.45 a $53 \mu\text{m}$ se consideran una fracción estable y las mayores a $53 \mu\text{m}$ un carbono más estable.

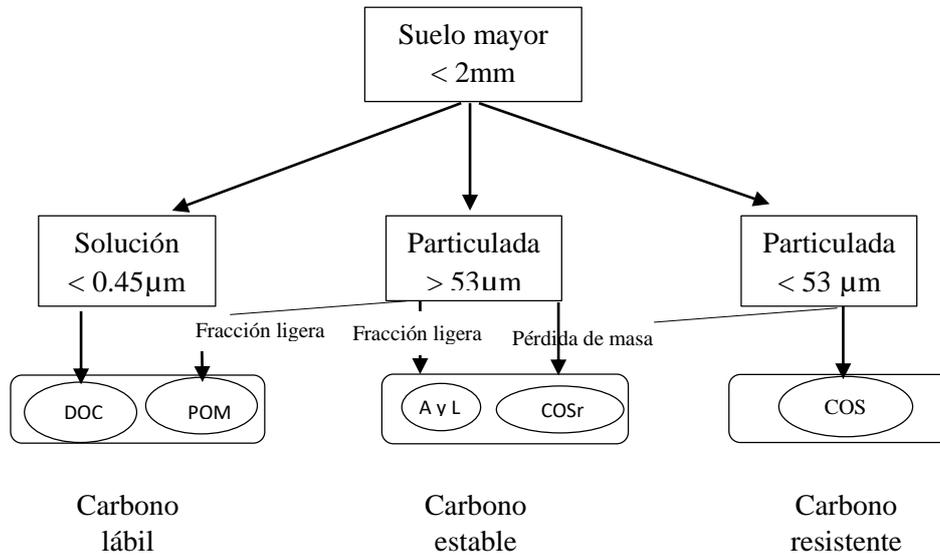


Figura 1: Fraccionamiento representativo del carbono del suelo (Zimmermann et al., 2007)

2.2.1. Biomasa microbiana del suelo

La biomasa microbiana del suelo (BMS), se refiere a la parte viviente de la materia orgánica, sin considerar las raíces de las plantas ni los organismos de tamaño mayor a $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ (Jekinson y Ladd, 1981). La BMS tiene doble función en el suelo: como agente de transformación de todos los materiales orgánicos que llegan al suelo y como una reserva lábil de nitrógeno, fósforo y azufre.

La calidad ambiental y productividad sostenida de los agroecosistemas están relacionados a la conservación de la BMS que está fuertemente influenciada por el manejo del suelo. Prácticas como labranza, rotación de cultivos, manejo de residuos y fertilización regulan la biomasa microbiana y la adición de residuos vegetales o estiércol animal, influyen positivamente la cantidad y actividad (Vidal et al., 1997).

El rango normal de carbono de biomasa expresada en función de su cantidad de carbono en suelos bajo cultivos de cereales es de 100 a 600 mg C kg^{-1} de suelo y puede exceder $1500 \text{ mg C kg}^{-1}$ de suelo, bajo pradera o en condiciones de suelo virgen. Sparling et al., (1992) reportó que después de 11 años manteniendo el cultivo de maíz de forma continua, el carbono de la biomasa se redujo en un intervalo de 54 a 60% en los 20 cm de superficie del suelo en

comparación de la pradera permanente. Collins et al., (1992) reportó con la reducción de 57 % del carbono de biomasa microbiana del suelo cuando hay quema del rastrojo.

En un estudio desarrollado por Vidal et al. (2007) se compararon dos tipos de manejo de suelo y dos métodos para determinar el carbono de la biomasa del suelo (Cuadro 3). Los resultados mostraron que entre los métodos de evaluación los promedios de carbono se mantienen en el mismo rango, las diferencias significativas se encuentran en el tipo de manejo, donde la labranza cero y la retención de residuos muestran las mayores cantidades de carbono de la biomasa microbiana del suelo.

Cuadro 3: Liberación de carbono orgánico extractable de la biomasa microbiana en dos tipos de rotación del suelo.

Tratamientos	Fumigación - incubación	Fumigación - extracción
	C - Biomasa ($\mu\text{g g}^{-1}$)	C - Biomasa ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Labranza		
Cero	344 a	330 a
Convencional	244 b	252 b
Residuos		
Retención	329 a	335 a
Remoción	276 b	257 b

FUENTE: Vidal et al., 1997

La significancia y aplicación para medir la fertilidad y la calidad del suelo por análisis del carbono de la BMS ha sido muy estudiada y sugiere ser una medida más provechosa y sensible que el COT, mientras que otros no concuerdan con el uso de esta fracción para medir la calidad del suelo, porque factores como especies particulares de organismos que están como parte de la biomasa microbiana y la humedad del suelo afectan marcadamente el tamaño de la biomasa microbiana (Prasad Datta et al., 2010).

2.2.2. Carbono orgánico disuelto (COD)

Es una mezcla compleja de sustancias de composición y propiedades químicas variadas. Es originaria de la hojarasca, el humus, biomasa microbiana y exudados de las raíces. Debido a esta reactividad, juega un rol importante en muchos procesos físicos, químicos, de

translocación de nutrientes y lixiviados, meteorización mineral y disponibilidad de nutrientes. Sólo una pequeña información de las dinámicas del COD está disponible y para un mejor entendimiento de la función el fraccionamiento surge como una herramienta para caracterizar su composición (Möller et al., 2010).

El tamaño límite de partícula, que es usado para diferenciar el COD de la materia orgánica particulada es arbitrario, pero en consenso universal el tamaño utilizado es de 0.45 μm . En sistemas insaturados como en el suelo común, los contenidos de agua determinan el mayor grado de COD, el material coloidal también puede considerarse en esta fracción. Curtin et al., 2012, desarrollaron un modelo conceptual del proceso de mineralización de la MOS, en el cual la materia orgánica disuelta (MOD) liberada es asumida como el paso limitante, una vez liberada la MOD en la solución del suelo es rápidamente mineralizada. Gregorich et al., 2003, mostraron que alrededor de un tercio del COS en los extractos de agua del suelo tienen un tiempo de reciclado de menos de 1 día a 35 °C; el carbono remanente también es relativamente lábil (reciclado en 80 días). La concentración de la MOD es extremadamente baja, pesar de que se tampona por la fase sólida de la MOS. La toma de MOD por la BMS también puede ser sensible a la temperatura, porque afecta directamente la actividad de las enzimas extracelulares que catalizan el rompimiento de las moléculas largas de MO para la biodisponibilidad de los compuestos (Miller y Dick, 1995; Skujins, 1976, citado por Curtin et al., 2012).

En adición la transferencia de masa de MOD a la BMS es más rápida a altas temperaturas porque hay un efecto positivo de la temperatura sobre la difusión de los solutos. Como la temperatura incrementa la toma rápida y utilización de la MOD, puede promover mayor desorción de la MOS manteniendo su baja concentración en la solución y creando gradientes de concentración de MOD. Estos factores podrían incrementar el flujo del MOD a las células microbianas (Curtin et al., 2012), este proceso es explicado en la Figura 2.

Las capas de hojarasca y los horizontes orgánicos en la parte superior, son las principales fuentes de COD en los suelos mientras que los horizontes minerales más profundos son los principales sumideros. En los ecosistemas de bosques, los flujos de COD desde la superficie al interior de los suelos minerales están estimados en 115 – 500 $\text{kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. y representan más del 35 % de la hojarasca anual en carbono (Guggenberger y Zech 1994).

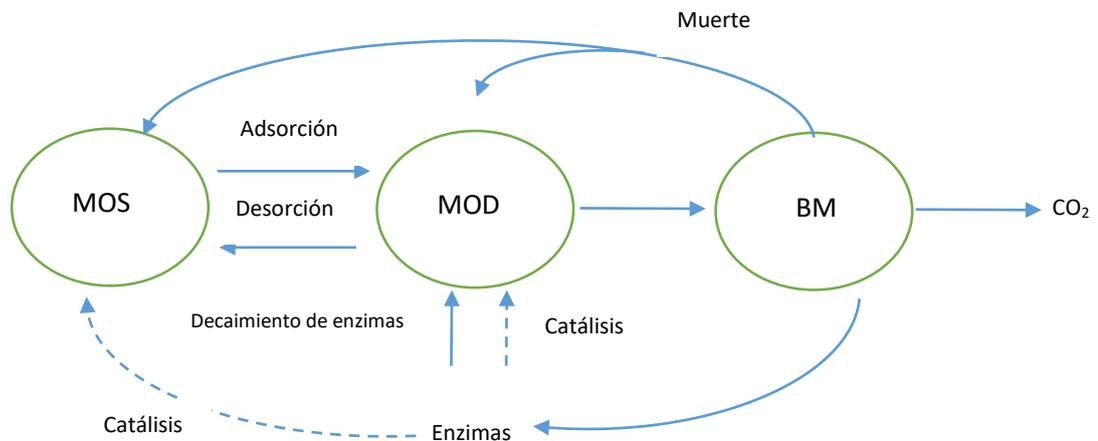


Figura 2: Modelo conceptual del proceso de mineralización del carbono: MOS, materia orgánica del suelo; MOD, materia orgánica disuelta; BM, biomasa microbiana (Curtin, et al., 2012).

Los flujos de COD desde la superficie a los horizontes más profundos del suelo disminuyen por la degradación de la solución suelo, la absorción del COD por los hidróxidos de hierro y aluminio y las arcillas. Por lo tanto las concentraciones de COD en los horizontes profundos son por lo general pequeñas (Guggenberger y Zech, 1999). Los rangos de retención en subsuelos minerales son de 40 a 370 kg COD ha⁻¹ año⁻¹. Dado que la mayoría de la reducción del COD es debido a las reacciones abióticas y no a la mineralización, el COD puede ser el principal contribuyente para las acumulaciones de carbono total en el suelo, incluyendo en el horizonte O, los cuales pueden alcanzar hasta 1440 kg C ha⁻¹ año⁻¹. La proporción que disminuye de COD con la profundidad del suelo es debida al consumo de los microorganismos o al almacenaje abiótico vía absorción o precipitación, aunque aun así es desconocido (Kalbitz y Kaiser, 2008). Aunque el COD es una parte muy pequeña de todo el carbono orgánico es una fracción muy sensible a los cambios en el suelo (Adisa y Nortcliff, 2010)

2.2.3. Carbono oxidable en permanganato (COXP)

El carbono lábil del suelo (CLS) es una fracción relativamente pequeña del COT y responde rápidamente a los cambios en el manejo del suelo (Weil y Magdoff, 2004, citados por Lucas, 2012). Esta fracción es importante para la calidad del suelo, porque tiene influencia en la estabilidad de los agregados y está directamente relacionado con la mineralización del carbono, nitrógeno y fósforo. Los parámetros del suelo relacionados al CLS incluyen el carbono de la biomasa microbiana, el nitrógeno de la biomasa microbiana, el carbono y

nitrógeno mineralizable, la materia orgánica particulada y la fracción ligera de la materia orgánica que son sensibles a las prácticas de manejo de suelo (Lucas y Weil, 2012).

El método de COXP (Weil, et al., 2003), es más sensible que el de carbono total del suelo y es sensible también a las prácticas que alteran el contenido de MOS. En un trabajo realizado por Melero et al., (2009) midieron indicadores de calidad del suelo incluyendo COXP, COT, COD, BMS y actividad enzimática del suelo, encontrando que el COXP es el indicador más susceptible de los indicadores para regímenes diferentes de labranza. Otros estudios han encontrado que el método de Weil et al. (2003) es también susceptible a los cambios inducidos por la adición de abonos orgánicos del suelo, tratamientos de cultivos de cobertura y sistemas de cultivos con altos aportes de materia orgánica (Lucas y Weil, 2012).

La oxidación química del carbono lábil con permanganato de potasio (KMnO_4) ha sido determinada como un índice provechoso para relacionar la influencia de diferentes recursos de calidad orgánica sobre las tasas de fracciones activas de carbono orgánico del suelo. Por el contrario algunos estudios indican que el uso del método como una advertencia temprana de los cambios del carbono orgánico del suelo no puede ser generalizado para todos los sistemas agrícolas, especialmente a los de pasturas (Prasad Datta et al., 2010).

El COXP puede ser útil para identificar los suelos donde la productividad puede ser mejorada con prácticas de manejo de la materia orgánica del suelo. Es probable que los suelos con baja concentración de COXP muestren una mayor respuesta al manejo de la MOS que los suelos con altas concentraciones de COXP.

Sobre la nomenclatura Weil et al., (2003) originalmente lo denominó como carbono activo y desde eso ha tenido varios nombres incluyendo: materia orgánica químicamente lábil, carbono rápidamente oxidable, carbono lábil y carbono orgánico del suelo oxidable en permanganato. Culman et al., 2012, propusieron uniformizar la denominación como carbono oxidable en permanganato (POXC por sus siglas en inglés).

Blair et al., (1995) desarrolló el índice de manejo de carbono (IMC), basado en el grado de labilidad del carbono orgánico del suelo y sugiere que este índice puede ser usado para evaluar el estado y velocidad del cambio del carbono orgánico del suelo en ecosistemas naturales y agrícolas. Este índice, es una medida de los cambios en el carbono lábil que están influenciados por el manejo del carbono orgánico total.

2.2.3.1. Determinación del índice de manejo del carbono

La continuidad del suministro del carbono al suelo depende del tamaño total de la fuente y su labilidad, para esto es necesario considerar un índice de manejo del carbono. Blair et al., (1995) desarrollaron y propusieron el índice que a continuación se describe:

- a. Cambio en la cantidad de carbono total:

La pérdida del carbono de un suelo con una gran reserva es de menor gravedad que la misma cantidad perdida de carbono de un suelo agotado o que inicia con una reserva pequeña. Un suelo con mayor carbono agotado es difícil de recuperar. El índice de reserva de carbono se calcula:

$$\text{Índice de reserva de C (IRC)} = \frac{C \text{ total de la muestra (mg. Kg}^{-1})}{C \text{ total en referencia (mg. Kg}^{-1})}$$

- b. La pérdida del carbono lábil tiene mayor consecuencia que la pérdida del carbono no lábil, el cálculo para el índice de labilidad del carbono es como sigue:

$$\text{Labilidad del C} = \frac{\text{Fracción de C oxidada por KMnO}_4}{\text{Remante de C no oxidado por KMnO}_4}$$

$$\text{Índice de labilidad (IL)} = \frac{\text{Labilidad del C en la muestra del suelo}}{\text{Labilidad del C en el suelo de referencia}}$$

- c. El índice de manejo de carbono se calcula:

$$\text{IMC} = \text{Índice de la reserva de C} \times \text{Índice de labilidad} = (\text{IRC}) \times (\text{IL}) \times 100$$

2.2.4. Materia orgánica particulada (MOP)

De las diferentes fuentes de carbono, la materia orgánica particulada, es considerada como un buen indicador de la calidad del manejo del sistema suelo y está directamente relacionada con la cantidad, calidad y frecuencia de la adición de los residuos de cultivos al suelo (Sá et al., 2011). La materia orgánica particulada, puede ser definida como la que incluye plantas que se metabolizan rápidamente, carbohidratos microbianos asociados y moléculas de carbono más recalcitrantes que derivan de materiales de descomposición de plantas resistentes y productos de descomposición microbiana (Plante et al., 2006).

La fracción ligera y la materia orgánica particulada, son dos de las formas más comunes de separar de forma física la materia orgánica no acomplejada. La fracción ligera es separada

usando líquidos de una densidad específica (1.6 a 2.0 g.cm^{-3}), la materia orgánica particulada es separada por su tamaño ($< 53 \mu\text{m}$) o por la combinación del tamaño y densidad (Gregorich et al., 2006).

El fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo ha permitido obtener información sobre su función en el suelo (Cambardella y Elliot 1994). Los métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica, están basados en la premisa que la asociación primaria de las partículas y su arreglo espacial tienen un rol importante en la función de la materia orgánica, y en determinar que el tamaño y grado de asociación de la MOS a partículas minerales inorgánicas regulan su dinámica (Gregorich et al., 2006).

La materia orgánica del suelo, puede ser protegida para su descomposición y estabilidad en los suelos por diferentes mecanismos, incluyendo la protección química por la asociación a la superficie mineral, protección física por la oclusión entre los agregados y la protección bioquímica por ser recalcitrante. Esta interacción es un proceso lento y gradual que crea una conexión entre las fracciones más lábiles, las más estables y fracciones complejas en el nivel de minerales coloidales (Sá et al., 2011).

Existen dos factores que afectan la cantidad de la materia orgánica físicamente no acomplexada y sus propiedades químicas y biológicas: Los factores que controlan la entrada de residuos para el suelo y los que controlan la actividad microbiana porque esta es la primera fuente de energía para los microorganismos (Gregorich et al., 2006).

2.3.Sistemas agroecológicos utilizados en la Amazonia peruana

2.3.1. Sistema multiestratos

Concertar sobre la agroforestería es un tema amplio y que data de hace más de 20 años atrás, Lundren y Raintree (1982), definen a la agroforestería como el nombre colectivo para los sistemas y tecnologías del uso de la tierra donde los árboles perennes y leñosos (árboles, arbustos, bambúes, palmas, etc.) son usados de forma libre en las mismas unidades de manejo de la tierra junto con cultivos agrícolas y/o animales en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal. En los sistemas agroforestales hay interacciones ecológicas y económicas entre los diferentes componentes.

Como sistema agroforestal, los multiestratos juegan un rol importante, debido a la gran variedad de productos económicos que pueden producir, obteniéndose mayor productividad

total, el uso de este sistema es sostenible, especialmente bajo condiciones de tierras marginales o de bajo niveles de uso de insumos.

El sistema de uso de tierra multiestratos involucra la parte social y ecológica de árboles con cultivos agrícolas y/o con una producción animal en forma simultánea y secuencial. Diversas especies de árboles de uso específico pueden ser utilizadas para incluirlas como árboles para producción de frutos, producción de materiales de construcción y madera.

Este sistema presenta las siguientes ventajas:

1. Producción de una gran variedad de productos para autoconsumo y venta.
2. Un flujo de ingresos estables y sostenidos a través del tiempo.
3. Menor riesgo para los agricultores con poco capital.
4. Conservación de la fertilidad natural del suelo debido al mantenimiento o incremento de la materia orgánica del suelo y un mejoramiento de las propiedades físicas del suelo (IIAP, 1996).

2.3.2. Sistema de pasturas

La ganadería de doble propósito (carne y leche) es una actividad importante en la Amazonia peruana. El 70 % de los bosques de la selva han desaparecido por la instalación de sistemas de pasturas para ganadería, de las cuales la gran mayoría consiste en pasturas degradadas dominadas por un complejo de gramíneas llamadas "torourco" (*Paspalum conjugatum* y *Axonopus compressus*).

Tradicionalmente, se han sembrado gramíneas pobremente adaptadas a suelos ácidos tales como el pasto yaragua (*Hyparrhenia rufa*) o el pasto Castilla (*Panicum maximum*), sin leguminosas ni abono. A medida que el efecto de las cenizas de la quema para la instalación de los pastizales disminuye, las gramíneas comienzan a desaparecer, aumentando además la presión del pastoreo ya que la carga de animales por hectárea se mantiene relativamente constante. Dicha práctica deviene en la desaparición de la gramínea sembrada y en el empurmamiento o praderas de torourco (IIAP, 1996)

2.3.3. Sistema de producción de pijuayo (*Bactris gasipae*)

Esta palmera presenta una serie de características deseables, lo cual hace posible su inclusión en sistemas agroforestales, en suelos ácidos e infértiles pero bien drenados. Esta palmera

está bien adaptada a estas condiciones y además su copa es relativamente pequeña, lo cual minimiza el sombreado causado a las plantas asociadas a ella.

Económicamente, el pijuayo produce una gran variedad de productos de consumo: frutos, palmito, material de construcción y de artesanía. Los frutos tienen un alto contenido nutricional y pueden ser usados tanto para consumo humano como para consumo animal mientras que el palmito es un importante producto de exportación. El crecimiento del pijuayo puede ser afectado por el nivel de nutrientes en el suelo (IIAP, 1996).

2.3.4. Sistema de producción de palma aceitera (*Elaeis guineensis*)

La palma africana de aceite, también llamada *Palma Aceitera* o *Palma Africana*, es el cultivo oleaginoso que mayor cantidad de aceite produce por hectárea; puede rendir de 3 a 5 TM de aceite crudo de palma por hectárea y de 600 a 1 000 kg de aceite de palma; su rendimiento es 10 veces superior a la soya, con materiales genéticos actuales se puede obtener mayor rendimiento; su producción inicia a los 3 años de sembrado, produce comercialmente durante 25 años; sus mejores producciones se dan entre 8 a 10 años, para luego estabilizarse (Ministerio de Agricultura, 2012).

3. Materiales y métodos

3.1. Ámbito de estudio

3.1.1. Localización del ámbito de estudio

Los sistemas evaluados se encuentran ubicados en la zona nororiental del Perú, en la provincia de Alto Amazonas, región Loreto. La Figura 3 muestra los sistemas evaluados, en tanto que el Cuadro 4 muestra las coordenadas geográficas y la altitud de cada parcela.

Cuadro 4: Coordenadas y altitud sobre el nivel del mar de los diez sistemas evaluados

Sistemas	Coordenadas		Altitud (msnm)
	Longitud este	Latitud sur	
Y1	375133.037	9343541.618	152
Y2	375248.808	9343155.187	165
Y3	375368.956	9343070.177	176
Y4	375276.113	9343155.76	153
Y5	376380.83	9343665.073	150
Y6	376156.595	9343719.137	139
Y7	369872.745	9339995.69	165
Y8	368330.562	9340556.623	182
Y9	359398.445	9322263.55	174
Y10	360688.937	9318555.471	178

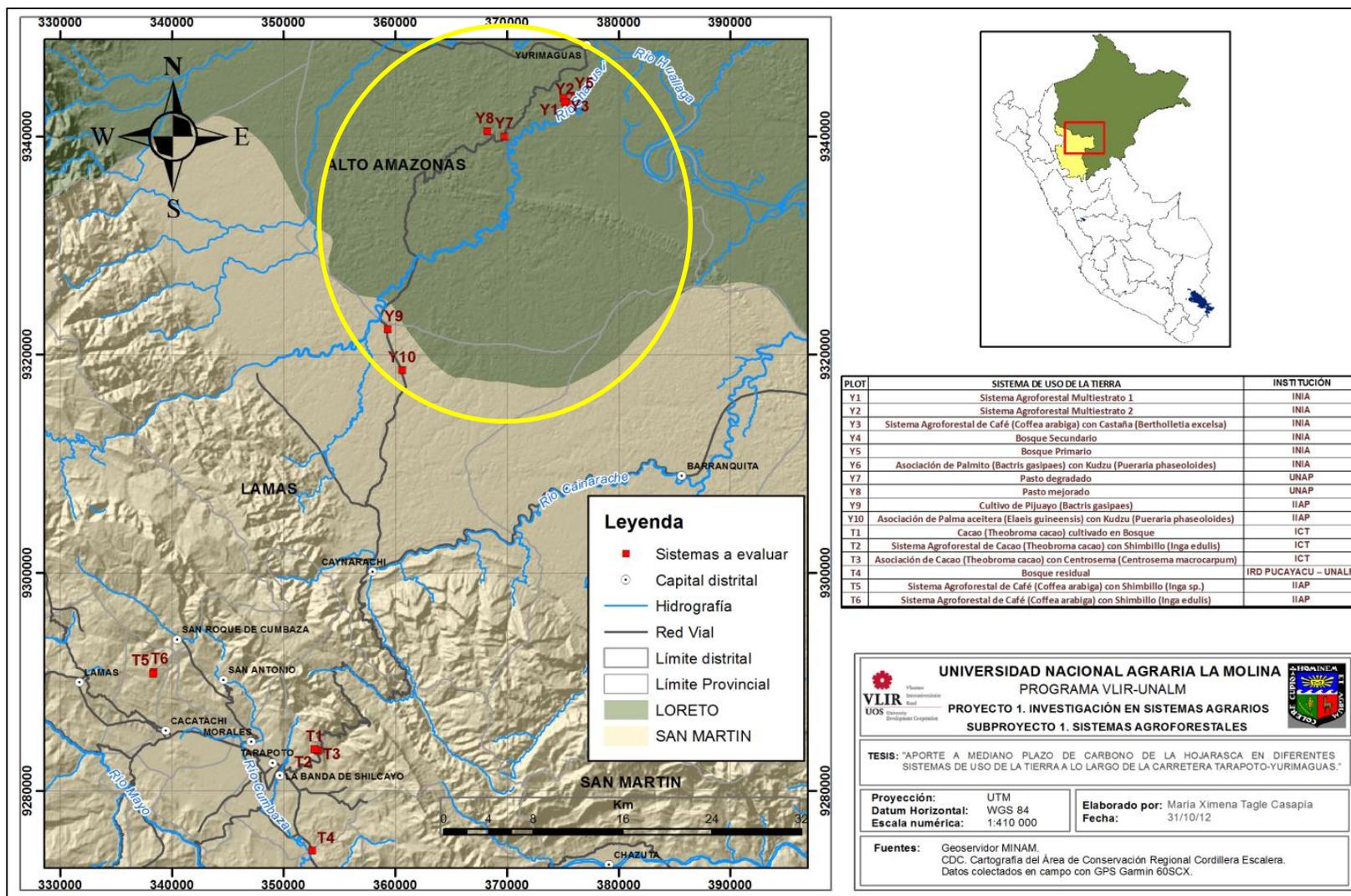


Figura 3: Mapa de ubicación de los sistemas evaluados. Tagle, (2013)

3.2. Características generales del área de estudio

a. Fisiografía

De acuerdo con el INGEMMET (1997) los sistemas de usos de tierras ubicados en Yurimaguas pertenecen a las unidades geológicas de depósitos fluviales (Qh-fl), los cuales ocupan el lecho actual del río o áreas inmediatas, y que representan la acumulación debido a corrientes fluviales recientes. Y a la formación Ipururo (N-i), la cual corresponde a la llanura Amazónica con sedimentos fluvio-aluviales (Minpimentel, 2009; Castro, 2005).

b. Clima

La zona se caracteriza por tener un clima cálido húmedo con lluvias regulares durante los meses de enero a abril (Municipalidad de Caynarachi, 2012), por otro lado, la estación “seca” ocurre principalmente en los meses de julio y agosto. El rango de precipitación se encuentra entre los 2 500 a 3 500 mm al año.

La temperatura promedio varía de 23 a 35 °C, y la humedad relativa oscila entre los 73 y 78 %. Las condiciones del viento que se presentan en esta zona son uniformes, presentando una predominancia hacia el Norte durante los meses de junio a agosto, originando la formación de neblinas (Minpementel, 2009). Para detalles del clima revisar la Figura 4: **Climograma de la zona de estudio.**

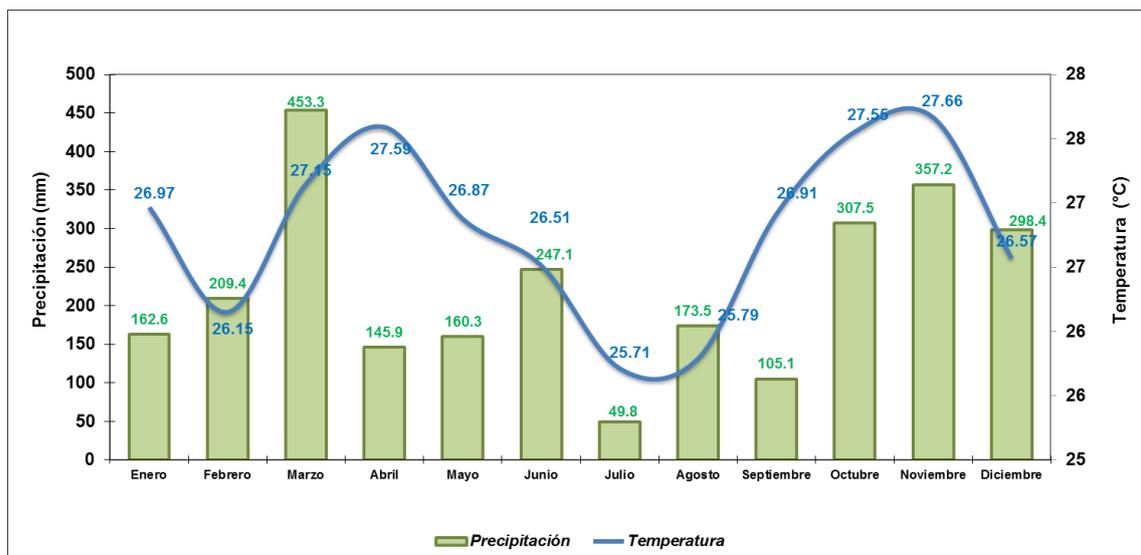


Figura 4: Climograma de la zona de estudio.

FUENTE: Elaboración propia.

c. **Ecología**

El área de estudio comprende las zonas de vida denominadas bosque húmedo-Premontano Tropical (bh-PT) y bosque húmedo-Tropical (bh-T) (ONERN, 1976).

d. **Hidrología**

El distrito de Yurimaguas se encuentra ubicado en la cuenca de Caynarachi, la cual posee dos subcuencas: la subcuenca del Alto Caynarachi y la subcuenca Yanayacu. La subcuenca del Alto Caynarachi el río principal abarca el 70 % de la zona, y se caracteriza por tener fuertes pendientes medias y poca sinuosidad. Este río nace en la faja subandina drenando toda la zona sureste de la cordillera Escalera, adoptando en las nacientes una forma de red de drenaje arborescente al pasar al llano amazónico. La subcuenca del Yanayacu presenta cabeceras de ríos de mayor desarrollo y menores pendientes, que aportan al Caynarachi a través del Yanayacu y otros afluentes que recorren áreas aun poco intervenidas (Portillo, 2001; Maco, 2005).

Los sistemas evaluados se encuentran en la subcuenca del Yanayacu, la misma que tiene ríos como Huallaga, que es navegable todo el año; Shanusi y Parapapura, que son navegables en épocas de abundancia de lluvias (Consorcio Hidrovía Huallaga, 2005).

e. **Aspectos económicos**

La provincia de Alto Amazonas cuenta con una población aproximada de 63 427 habitantes. La vía de acceso hacia el interior del distrito y la provincia es de forma fluvial por los ríos Huallaga y Parapapura. La carretera Interoceánica Norte, es la que comunica de forma fluida a la ciudad de Tarapoto, lo que permite el intercambio comercial y un desplazamiento poblacional masivo (Gema, 2011). La capital de la provincia es la ciudad de Yurimaguas.

La actividad más resaltante es la del sector de servicios, debido al conjunto de actividades comerciales y financieras, así como el de transporte; por la cual Yurimaguas ocupa un lugar estratégico en la región nororiental. El sector de la actividad industrial es escasa, debido a que solo existen actividades como la elaboración de ladrillos, gaseosas, fabricación de triplay, entre otros (Gema, 2011).

Las actividades económicas en donde se concentra el mayor número de mano de obra, son: la agricultura y el comercio (de consumo, insumos y capital). Adicionalmente se practica la pesca, acuicultura y la actividad turística, la cual se viene desarrollando lentamente. Esta

última permite en buena parte la generación de ingresos a la población local, a pesar de tener limitaciones en cuanto a la disponibilidad y la calidad de los servicios (Plan Maestro ACR-CE, 2007).

Los principales cultivos agrícolas de la zona son la palma aceitera, palmito, cacao, arroz y maíz, aunque este último está disminuyendo paulatinamente. Además se pueden encontrar cultivos en pequeña escala tales como el plátano, yuca, fríjol, caupí, cítricos, pijuayo, papaya, algodón, caña de azúcar y otras especies de frutales y pastos, en menor extensión (Gema, 2011).

Es necesario resaltar que la mayor parte de los agricultores de la zona se caracterizan por no fertilizar, no emplean productos químicos durante toda la etapa productiva de sus cultivos básicamente por desconocimiento sobre el uso de fertilizantes, a su vez existen algunos agricultores que son orgánicos (palmito orgánico) por la demanda de los países industrializados.

La actividad pecuaria de la zona tiene como bases la crianza de vacunos, porcinos y aves de corral. En cuanto a la pesca, esta actividad se realiza de manera artesanal en embarcaciones pequeñas en los ríos que colindan con la ciudad (Gema, 2011).

También se presenta extracción de especies forestales para leña, y para ganar áreas agrícolas (Minpimentel, 2009).

3.3. Metodología

3.3.1 Descripción de las unidades de muestreo

Se evaluaron 10 sistemas de usos de la tierra (SUT), el criterio de elección de los SUTs, se basó en la representatividad de los productos obtenidos de estos dentro de las actividades económicas de la población, es así que se cuentan con 10 sistemas que reflejan los principales usos de tierra en la zona evaluada. Los antecedentes y características de cada uno se describen en los Cuadro 5 y Cuadro 6: **Características de los sistemas de uso del suelo (SUS) evaluados.**

Cuadro 5: Antecedentes de los sistemas de uso del suelo (SUS) evaluados.

Sistema	Año de instalación	Cobertura anterior	Observación
SAF Multiestrato 1	1985	Bosque secundario de 10 años	Suelo de textura franca arenosa, pero con mayor porcentaje de arcilla.
SAF Multiestrato 2	1985	Bosque secundario de 10 años	Suelo de textura franca arenosa, pero con mayor porcentaje de arena.
SAF de Café con Castaña	1987	Bosque secundario de 12 años	
Bosque Secundario de 29 años	1984	Campo de arroz, yuca, plátano.	
Bosque Primario	-	-	Edad de más de 200 años
Asociación de pijuayo	2008	Pastizal	Se abonó con 200 g de Roca fosfórica por hoyo.
Pasto degradado	1969	Bosque secundario	Degradación por sobrepastoreo
Pasto mejorado	2009	Bosque secundario	Ladera más arcillosa, parte baja más arenosa.
Cultivo de palmito	2006	Pastizal	Primer abonamiento 16/06/11 (después de muestreo). R2 mal drenaje. R3 más arenosa.
Asociación de Palma aceitera con kudzu	2004		Fertilizado el 18/05/10 con Urea, KCl, Magnecal, Roca fosfórica y Fertibagra. Aplicación de herbicida Bazuka (glyphosate).

FUENTE: Tagle, 2013.

Cuadro 6: Características de los sistemas de uso del suelo (SUS) evaluados.

Sistema	Socio estratégico	Área (ha)	Pendiente promedio (%)	Composición florística
				Estrato bajo: Inicialmente rotación de arroz (cv. africano desconocido) y caupí (cv. Vita 7).
SAF Multiestrato 1	INIA	0.2	1.0	Estrato medio: Pijuayo (<i>Bactris gasipaes</i>), Huaba (<i>Inga sp.</i>) y Arazá (<i>Eugenia stipitata</i>). Estrato alto: Tornillo (<i>Cedrelinga catenaeformis</i>) y Shaina (<i>Colubrina glandulosa</i>).
SAF Multiestrato 2	INIA	0.2	4.0	Cobertura: <i>Centrosema macrocarpum</i> .
SAF de Café con Castaña	INIA	0.2	1.0	Castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>) 12 x 8 m y café (<i>Coffea arabica</i>) 2 x 1 m
Bosque Secundario de 29 años	INIA	0.3	3.8	<i>Alchornea cordata</i> , <i>Cedrela sp.</i> , <i>Jacaranda copaia</i> , <i>Terminalia sp.</i> , <i>Unonopsis floribunda</i> , <i>Sloanea sp.</i> , <i>Aniba sp.</i> , <i>Inga sp.</i> , <i>Siparuna sp.</i>
Bosque Primario	INIA	0.3	6.0	<i>Apuleia sp.</i> , <i>Chrysophyllum scalare</i> , <i>Duguetia sp.</i> , <i>Eschweilera sp.</i> , <i>Hymenaea sp.</i> , <i>Protium sp.</i> , <i>Simarouba amara</i> .
Asociación de pijuayo	INIA	0.1	4.0	Pijuayo (<i>Bactris gasipaes</i>) 5x5, Kudzu (<i>Pueraria phaseoloides</i>)
Pasto degradado	UNAP	0.7	3.5	<i>Axonopus compressus</i> (80%), <i>Andropogon bernuis</i> (10%), <i>Cyperaceae</i> (10%)
Pasto mejorado	UNAP	0.4	4.0	<i>Brachiaria (Brachiaria brizantha)</i> (75%), <i>Centrosema (Centrosema macrocarpum)</i> (11%), Kudzu (<i>Pueraria phaseoloides</i>) (14%)
Cultivo de palmito	IIAP	1.2	2.9	Palmito (<i>Bactris gasipaes</i>) 2x1m.
Asociación de Palma aceitera con kudzu	IIAP	0.4	1	Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>) (123 pl. ha ⁻¹) con kudzu (<i>Pueraria phaseoloides</i>) con 65 % de cobertura

FUENTE: Tagle, 2013.

3.3.2. Muestreo de suelos

La toma de muestra se dio a dos niveles de profundidad, la primera abarcó los primeros 15 cm y la segunda de 15 - 30 cm.

Se colectó una muestra por cada especie arbórea o herbácea presente en el sistema, para ampliar a base de datos de fracciones orgánicas de carbono entre las especies. Los detalles del número de muestras y sistemas muestreados, se describen en el Cuadro 7: **Número de muestras obtenidas por cada sistema de uso del suelo.**

Cuadro 7: Número de muestras obtenidas por cada sistema de uso del suelo.

Código	Sistema	Número de muestras	Abreviatura
Y1	Multiestratos 1	12	Mult. 1
Y2	Multiestratos 2	12	Mult. 2
Y3	Castaña Brasileira (<i>Bertholletia excelsa</i>) y café (<i>Coffea arabica</i>)	24	Cast. – Caf.
Y4	Bosque secundario	6	Bosque S.
Y5	Bosque primario	6	Bosque P.
Y6	Pijuayo (<i>Bactris gasipaes</i>)	12	Pij. – Kud.
Y7	Pastura degradada (<i>Axonopus compressus</i>)	6	Pasto D.
Y8	Pastura mejorada (<i>Brachiaria brizantha</i>)	6	Pasto M.
Y9	Palmito (<i>Bactris gasipaes</i>)	12	Palmito
Y10	Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>)	12	Palma
TOTAL DE MUESTRAS		108	

3.3.3 Análisis de las fracciones de carbono

a. Caracterización de suelos

Los análisis de caracterización de suelos, se realizaron en el laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF – UNALM). (Cuadro 8: Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas evaluados a los 15 cm de profundidad Cuadro 9: Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas evaluados de 15 a 30 cm de profundidad.)

Cuadro 8: Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas evaluados a los 15 cm de profundidad

Sistemas	pH (1:1)	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis mecánico			Clase textural	Cationes cambiabiles						Suma de cationes	% Sat. de bases
					Arena	Limo	Arcilla		CIC	Ca ⁺	Mg ⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H ⁺		
					%	%	%		meq/100g							
Mult. 1	3	2	4	34	78	20	2	Fr.A.	6.0	0.7	0.1	0.2	0.2	1.5	2.7	20.4
Mult. 2	3	1	3	24	91	9	0	Fr.A.	3.5	0.6	0.1	0.1	0.2	0.9	1.8	28.5
Cast. – Caf.	4	2	3	29	79	20	1	Fr.A.	6.7	0.8	0.1	0.1	0.2	1.5	2.7	18.0
Bosque S.	4	2	4	33	91	9	0	Fr.A.	5.0	0.5	0.1	0.1	0.3	0.8	1.8	20.2
Bosque P.	4	3	4	69	67	29	4	Fr.A.	11.3	1.5	0.4	0.1	0.3	1.9	4.1	20.1
Pij. – Kud.	4	2	4	28	71	29	0	Fr.A.	7.3	0.9	0.2	0.1	0.2	0.8	2.2	19.3
Pasto D.	5	2	4	65	87	13	0	Fr.A.	4.5	0.8	0.4	0.1	0.3	0.3	1.9	36.3
Pasto M.	5	3	2	93	81	19	0	Fr.A.	9.3	3.4	0.9	0.2	0.3	0.1	4.9	51.6
Palmito	4	2	3	31	81	18	1	Fr.A.	6.6	0.7	0.1	0.0	0.2	0.6	1.7	16.5
Palma	3	2	4	29	87	13	0	Fr.A.	5.0	0.4	0.1	0.0	0.2	0.7	1.3	13.6

Cuadro 9: Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas evaluados de 15 a 30 cm de profundidad.

Sistemas	pH (1:1)	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	% Sat. De Bases	
					Arena %	Limo %	Arcilla %		CIC	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺			Al ⁺³ +H ⁺
					meq/100g											
Mult. 1	3	1	3	22	73	20	7	Fr.A.	6.1	0.6	0.1	0.1	0.2	2.1	3.0	15.7
Mult. 2	4	1	2	20	88	10	2	Fr.A.	4.0	0.6	0.1	0.1	0.2	1.0	1.9	23.7
Cast. – Caf.	4	1	3	20	75	22	4	Fr.A.	7.4	0.6	0.1	0.1	0.2	2.2	3.1	13.6
Bosque S.	4	1	3	21	85	15	0	Fr.A.	5.7	0.5	0.1	0.1	0.2	1.3	2.2	15.3
Bosque P.	4	2	3	52	64	33	0	Fr.A.	10.1	0.7	0.2	0.1	0.2	2.5	3.7	12.0
Pij. – Kud.	4	2	3	21	66	31	2	Fr.A.	7.1	0.8	0.1	0.0	0.2	0.9	2.0	16.3
Pasto D.	4	1	3	42	85	13	2	Fr.A.	4.2	0.6	0.1	0.1	0.3	0.5	1.6	27.7
Pasto M.	5	2	2	32	78	20	2	Fr.A.	7.4	2.1	0.5	0.1	0.3	0.2	3.1	39.7
Palmito	4	1	2	22	78	18	4	Fr.A.	6.1	0.4	0.1	0.0	0.2	0.9	1.6	12.0
Palma	4	1	3	22	81	18	1	Fr.A.	5.5	0.3	0.1	0.0	0.2	1.0	1.6	11.2

b. Contenido de arcillas

La determinación del contenido de arcillas se realizó por el método del hidrómetro de Bouyoucos, 1962.

c. Carbono total del suelo

Se determinó por el método de Walkley y Black modificado (Walkley y Black, 1934).

d. Carbono oxidable en permanganato

Este método es tomado de las referencias de Blair et al., (1995) y Weil et al., (2003). El fundamento del método consiste en oxidar la fracción lábil del carbono del suelo con una solución de ataque de permanganato de potasio (KMnO_4). Este procedimiento es aplicable a muestras de suelos. La descripción gráfica del procedimiento se detalla en la figura 5.

Procedimiento:

- Solución “stock” de permanganato de potasio:

Pesar 3.161 g KMnO_4 y completar con agua destilada a un volumen total de 100 mL. De esta solución tomar 50 mL y llevar a un volumen de 500 mL con agua destilada. Esta es la solución de oxidación para las muestras. Pesar 5 g de muestra de suelo homogenizada y tamizada a 2 mm en un tubo para centrífuga de 50 mL, añadir 20 mL de la solución de oxidación y llevar a agitación en el agitador horizontal por 5 minutos, luego llevar a centrifuga por 5 minutos a 3500 rpm, transferir 0.5 mL del sobrenadante en un tubo para centrífuga conteniendo 45 mL de agua destilada y enrazar a 50 mL, cerrar el tubo, agitar manualmente y leer en colorímetro a 550 nm

- Curva de calibración:

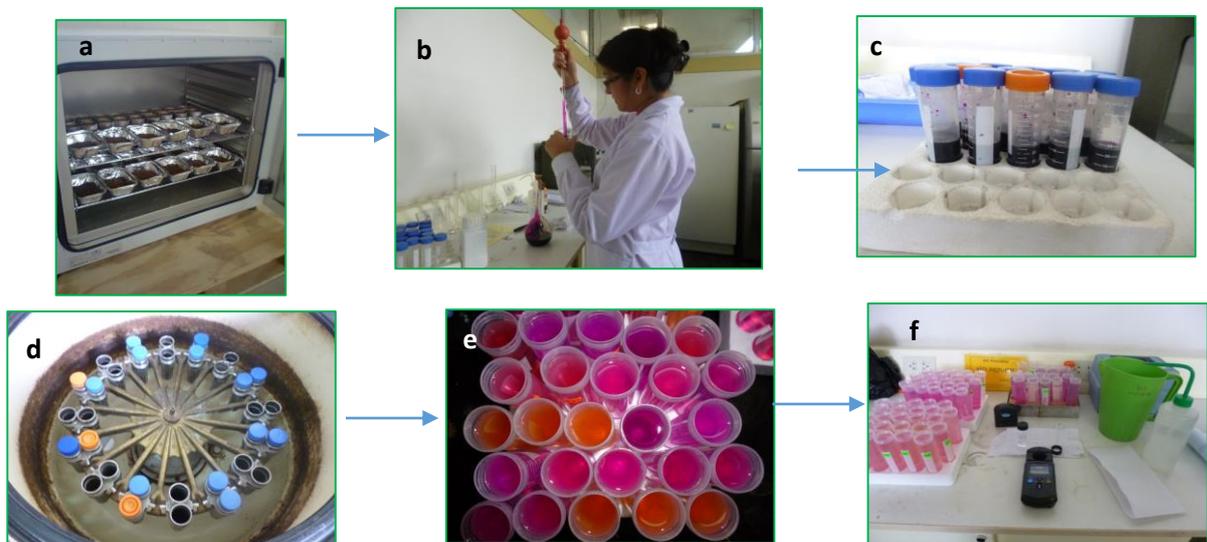
Preparar una solución patrón con 2.5 mL de solución de oxidación y 7.5 mL de agua destilada. De esta solución tomar 0.5 mL, 1 mL y 2 mL y transferir cada volumen a un tubo para centrífuga de 50 mL, conteniendo 45 mL de agua y enrazar a 50 mL, agitar manualmente y leer en el colorímetro a una longitud de onda de 550nm y hacer una curva de calibración. Anotar las absorbancias.

- Cálculos

$$POXC = [0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} - (a + b \times \text{Abs})] \times (9000 \text{ mg C} \cdot \text{mol}^{-1}) \times \left(\frac{0.02 \text{ L solución}}{0.005 \text{ kg suelo}} \right)$$

Donde:

0.02 mol/L: es la concentración de la solución inicial de KMnO_4 ; a y b: intercepto y la pendiente de la curva estándar; Abs: Absorbancia obtenida por el colorímetro; 9000 mg: Peso de carbono (0.75 mol) oxidado por 1mol de MnO_4^- cambiando de Mn^{7+} a Mn^{2+} . Estimación realizada por Blair et al., (1995); 0.02 L: Volumen de la solución de KMnO_4 que reaccionó y 0.005 kg: Peso del suelo usado.



Secuencia 1: a. Secado de muestras de suelo; b. “ataque” de muestras con solución de KMnO_4 ; c. Muestras con solución de KMnO_4 ; d. Centrifugación de muestras; e. y f. Muestras listas para determinación con colorímetro.

e. Biomasa microbiana del suelo

La técnica de fumigación/extracción de Jenkinson y Powlson (1976), se basa en el análisis de CO_2 liberado en muestras de suelo previamente fumigadas con cloroformo y posteriormente inoculadas con suelo fresco y comparado a su vez con otras muestras de suelo sin fumigar.

- Fumigación de la muestra seca de suelo con cloroformo:

Pesar aproximadamente 170 g de muestra húmeda de suelo y llevar a secado en estufa a 60 °C por 48 horas.

Transcurridas las 48 horas, sacar las muestras de la estufa, suavizar los terrones secos de la muestra con un mortero, pesar 30 g de muestra seca en cada placa Petri, colocar las placas Petri en la campana desecadora y 40 mL de cloroformo químicamente puro en el centro de la campana, generar vacío en la campana con una bomba por 10 minutos a través de la válvula. Tapar la campana con una bolsa negra para evitar el contacto de las muestras con luz, por un tiempo de 48 horas.

Transcurridas las 48 horas, sacar el exceso de cloroformo con la bomba de vacío.

- Incubación de las muestras:

Preparación para R1 y R2: Suelo seco fumigado + inóculo

Colocar los 30 g de suelo seco fumigado y pesar el inóculo (suelo fresco sin fumigar) en relación a la humedad de la muestra. Colocar el inóculo en el frasco con el suelo seco fumigado y homogenizar la mezcla, agregar el volumen necesario de agua para llevar a capacidad de campo.

Colocar 15 mL de solución de hidróxido de sodio (NaOH 1N) dentro del frasco con el suelo más inóculo, cerrar herméticamente y llevar los frascos a incubación por 10 días a 25 °C.

Preparación para R3 y R4: Suelo húmedo basal (fresco)

Pesar el equivalente a 30 g de suelo seco (sacando relación con el contenido de humedad), colocar el suelo en los frascos, junto con los envases conteniendo la solución de hidróxido de sodio (NaOH 1N), cerrar herméticamente, llevar a incubación por 10 días a 25°C

Cálculos

Se utilizan dos fórmulas para determinar la cantidad de biomasa microbiana en el suelo

$$\text{Respiración}(\text{mg C. g suelo}^{-1}) = \frac{[(B \times N \text{ ácido}) - (\text{gasto} \times N \text{ ácido})] \times 22\text{mg CO}_2}{\text{peso suelo} \times D.I.}$$

Donde:

B: Volumen del blanco utilizado (mL), N. ácido: Normalidad del ácido utilizado, Gasto: Gasto realizado con el ácido para titular la muestra (mL), Peso del suelo: 30gramos de suelo seco, D.I.: Número de días de incubación.

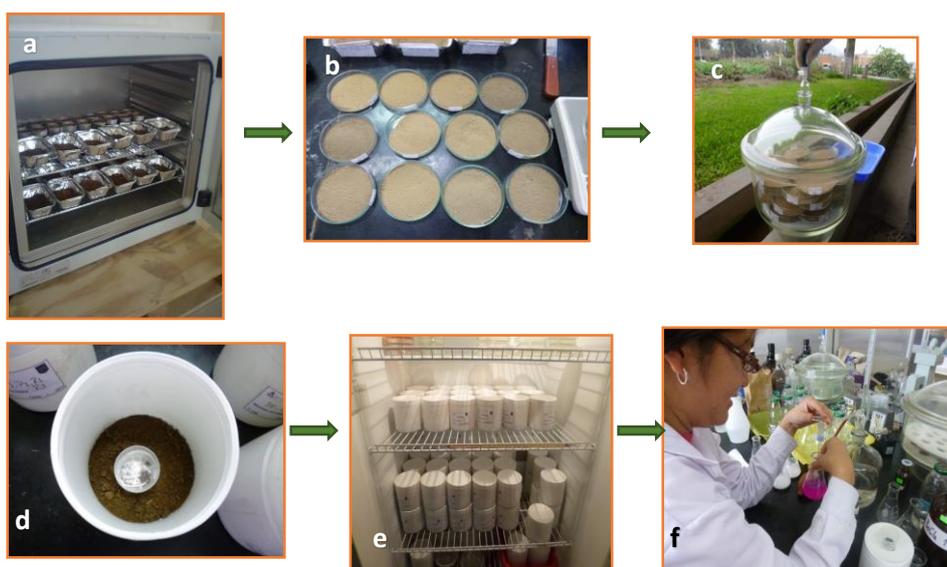
La fórmula de respiración debe ser usada para cada uno de los tratamientos: Suelo fumigado más inóculo y el suelo sin fumigar (Basal).

La fórmula para biomasa microbiana:

$$\text{Biomasa microbiana (mg C. g suelo}^{-1}) = \frac{[X - Y]}{k}$$

Donde:

X: Respiración del suelo fumigado (mgC.g suelo⁻¹), **Y:** Respiración del suelo basal (mgCO₂.gsuelo⁻¹), **k:** Constante determinada por varios autores, se usa en general el valor 0.45 que representa la fracción de la biomasa total del suelo que puede ser mineralizada en estas condiciones.



Secuencia 2: a. Secado de muestras en estufa; b. Muestras tamizadas en placas Petri; c. Muestras fumigadas con cloroformo; d. Muestras con la trampa de álcali (NaOH 1N); e. Incubación de muestras herméticamente cerradas; f. Titulación de muestras.

f. Carbono orgánico disuelto (COD)

La fracción de carbono que se analiza por este método es la que es soluble en agua fría, también se puede extraer las fracciones de carbono solubles en agua caliente (Ghani y Dexter, 2003).

- Procedimiento

Pesar 3 g de muestra de suelo en un tubo de centrífuga de 50 mL, agregar 30 mL de agua destilada y llevar a agitación horizontal por 30 minutos, finalizada la agitación, centrifugar las muestras por 20 minutos a 3500 rpm, tomar el sobrenadante y filtrarlo con un filtro de nitrato de celulosa de 0.45 µm de tamaño de poro, en los viales del analizador de carbono total.

Analizar el carbono soluble en empleando el analizador de carbono total TOC-L Shimadzu, siguiendo el instructivo de uso. Este equipo reporta las concentraciones de carbono que se encuentran en la muestra.

g. Materia orgánica particulada (MOP)

La materia orgánica particulada es definida como el material que pasa a través de un tamiz de 2mm pero es retenido en un tamiz de 53 µm (menos la arena). Este método es tomado de la referencia de Cambardella y Elliot, 1992.

- Procedimiento

Pesar 10 g de suelo fresco, en un tubo de centrífuga de 50 mL, agregar 30 mL de solución de hexametafosfato de sodio 0.5 % a la muestra de suelo, llevar a agitación horizontal por 15 horas, luego de la agitación, pasar las muestras por un tamiz de 53 µm, enjuagando muchas veces con agua destilada, colocar el material retenido en un crisol (previa rotulación y pesado del crisol) y secar todo el material en estufa a 50 °C por 48 horas.

Una vez secado el material retenido en el tamiz de 53 µm, tomar peso de la muestra con el crisol y llevar a calcinación en una mufla a 400 °C, por 6 horas.

Cálculos

Para determinar la cantidad de materia orgánica particulada

$$MOP (g) = PSSE - PSCM$$

MOP: Materia orgánica particulada

PSSE: Peso suelo seco a estufa en gramos.

PSCM: Peso suelo calcinado en mufla en gramos.



Secuencia 3: a. Muestras de suelo con solución de hexametáfosfato de sodio 0.5 %; b. Lavado de muestras y tamizaje; c. Colecta de muestra en crisol para ser secado en estufa; d. Muestras en crisoles secadas en estufa.

3.4. Análisis estadístico

Las variables evaluadas se tabularon y registraron en una base de datos, ordenándose por sistema de uso de la tierra, ubicación en la plantación, profundidad de muestreo y repetición. Ante la diversidad de factores que influyen en los parámetros químicos, se utilizó la estadística descriptiva, correlacionando las variables en función de los sistemas, y profundidades de muestreo. Dos herramientas estadísticas pueden ser empleadas en la descripción de las variables: el Análisis Exploratorio Multivariado, realizado mediante la elaboración de clústeres, en los cuales las variables múltiples son representadas en conglomerados; y la exploración de la variabilidad de datos mediante los diagramas de caja (Boxplot). Para el análisis estadístico, se utilizó el software Infostat V.12.

4. Resultados

4.1. Contenido de fracciones de carbono orgánico en los sistemas de uso de suelo evaluados.

Para el caso de la BMS, el sistema con mayor contenido fue el multiestratos 1, seguido por el sistema de palma aceitera y el sistema de pastura degradada. Los sistemas con los valores medios de BMS son el bosque primario, pastura mejorada, palmito y bosque secundario y los sistemas con los menores contenidos de BMS son el de pijuayo, castaña brasilera y multiestratos 2.

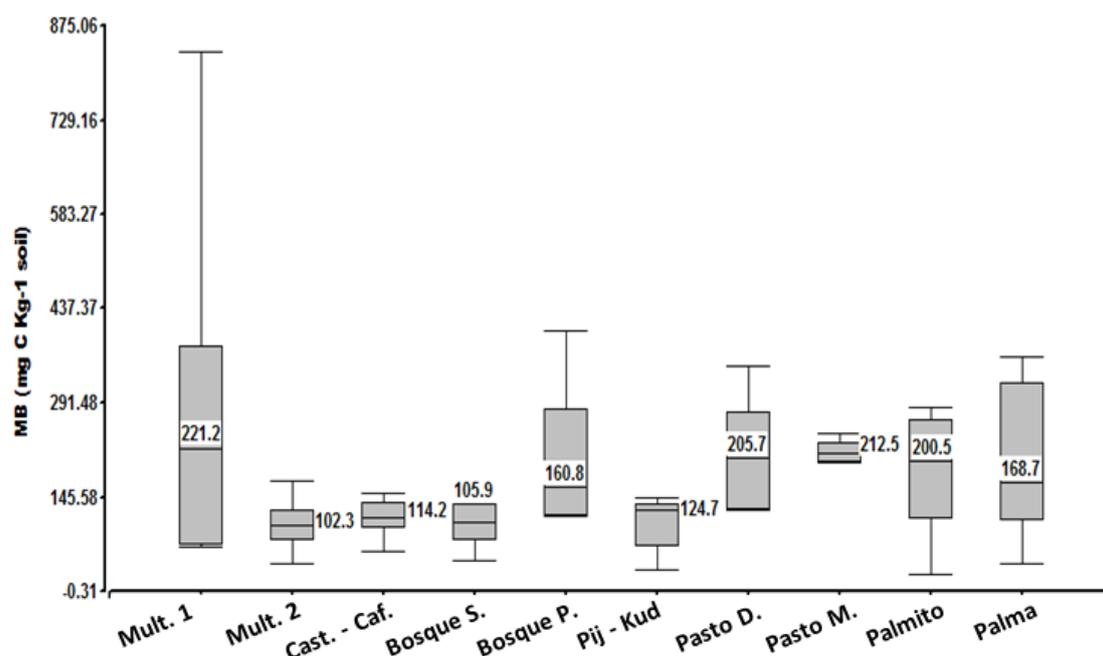


Figura 5: Boxplot de las concentraciones de biomasa microbiana en los sistemas de uso de suelo evaluados.

La fracción de COD, tiene mayor presencia en los sistemas de bosque primario, multiestratos 2 y el bosque secundario, siendo los sistemas con contenidos medios el multiestratos 1, el sistema de pastura degradada, el pijuayo, y el de pastura mejorada. Los sistemas con contenidos bajos de esta fracción son los de castaña brasilera y café, palma aceitera y el de palmito.

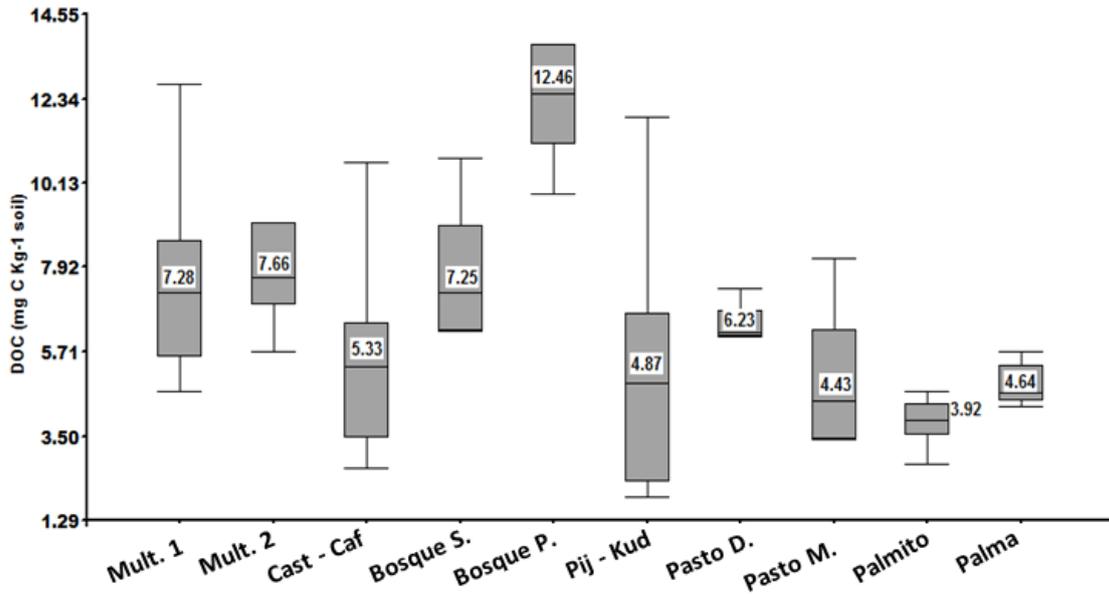


Figura 6: Boxplot de las concentraciones de carbono orgánico soluble en los sistemas de uso de suelos evaluados.

Los sistemas con mayor contenido de MOP son el bosque primario, multiestratos 1 y el de pastura degradada, seguidos por los sistemas con los contenidos medios los sistemas multiestratos2, pastura mejorada, el sistema de pijuayo y el de palma aceitera. Los sistemas con los menores contenidos de MOP son los sistemas de palmito, castaña brasilera y el bosque secundario.

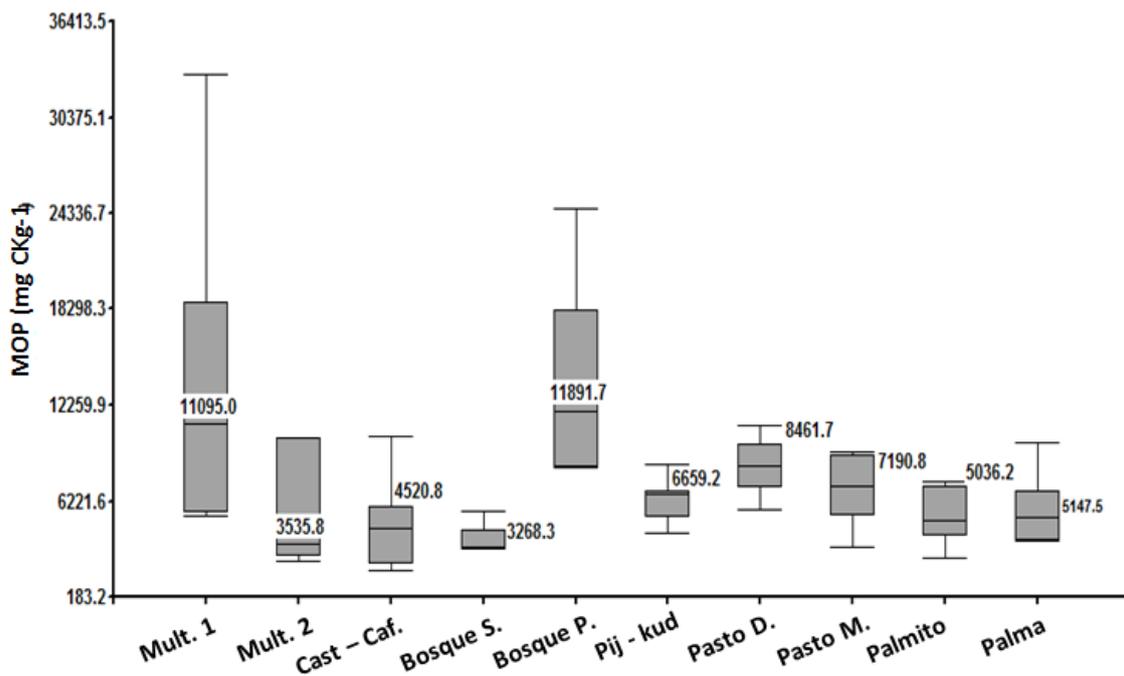


Figura 7: Bloxpot de las concentraciones de materia orgánica particulada en los sistemas de uso de suelos evaluados.

En relación a la fracción de COXP los tres sistemas con los mayores contenidos son el pijuayo, multiestratos 1 y la pastura mejorada. Los sistemas con los contenidos medios son pastura degradada, bosque primario, multiestratos 2 y el palmito y por último los tres sistemas con los contenidos más bajos son el de palma aceitera, castaña brasilera y café, bosque secundario.

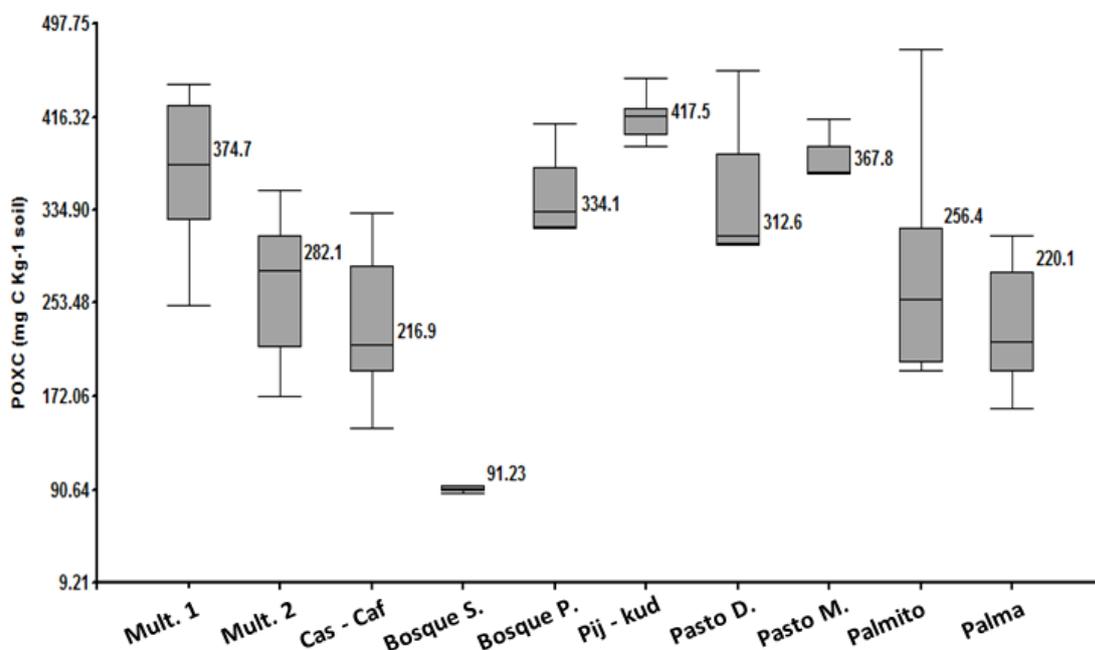


Figura 8: Boxplot de las concentraciones de carbono oxidable en permanganato en los sistemas de uso de suelo.

4.2. Análisis de clúster de la relación entre los sistemas de usos de suelo evaluados en función a sus fracciones de carbono orgánico.

En la figura, se observa la formación de cuatro conglomerados (A, B, C y D), así como la distancia entre cada uno de los sistemas evaluados. Además se puede comprobar que los sistemas más distantes en relación al resto son el bosque primario y multiestrato 1, que se caracterizan por tener valores altos en las fracciones del carbono orgánico lábil; por lo contrario los sistemas de palmito y palma aceitera que conforman el primer grupo (A), poseen distancias cercanas a “0”.

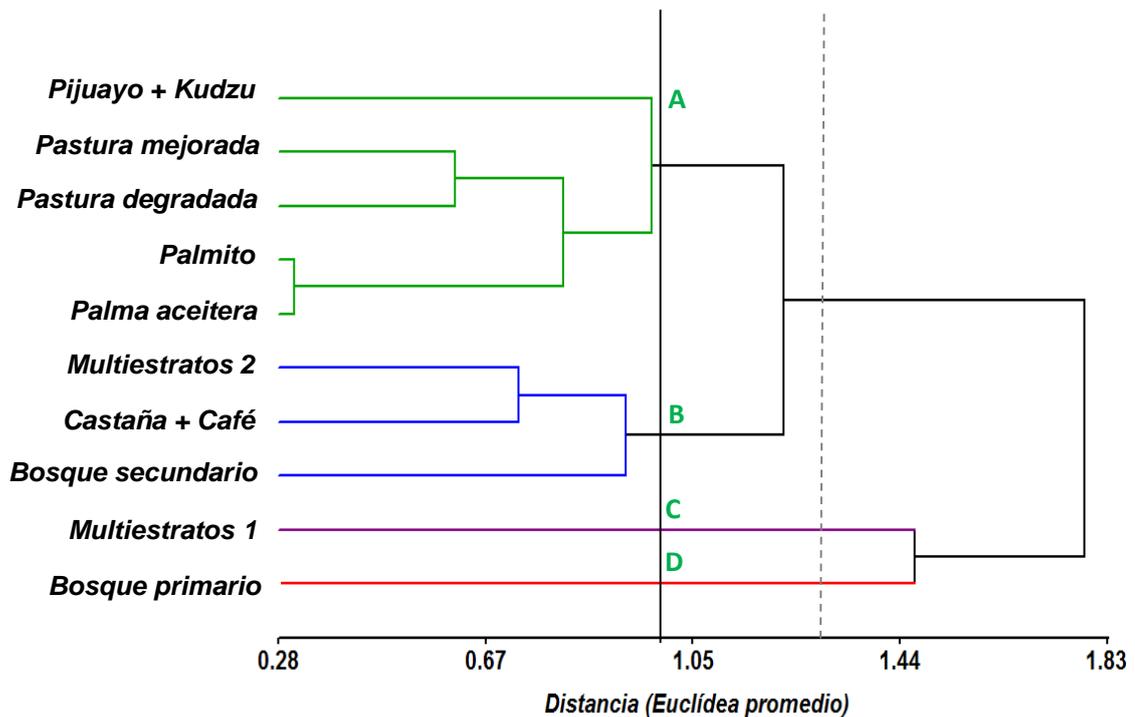


Figura 9: Análisis de clúster para las fracciones de carbono orgánico lábil y los sistemas de uso de suelo evaluados

Se puede considerar que en general los sistemas son bastante homogéneos, ya que en su mayoría, a una distancia de 1.3 estas se unen; sin embargo, hay algunas que se alejan de los demás, como el caso del sistema bosque primario y multiestrato 1.

4.3. Proporción de fracciones en función del carbono orgánico total del suelo.

La MOP, es considerada un indicador importante de la calidad del suelo, para conocer la relación que existe entre el COT del suelo y la MOP de los sistemas evaluados se obtuvieron porcentajes de fracciones considerando que el COT es el 100 %, la MOP ocupa un porcentaje importante en los contenidos del carbono lábil. Los sistemas con mayores porcentajes de MOP son el multiestrato 1, multiestrato 2 y la palma aceitera, los demás sistemas tienen valores entre 20% y 15% de MOP. En el porcentaje de RESTO se debe considerar a las fracciones medianamente activas y a las más recalcitrantes de la materia orgánica. Como se puede observar en la figura 4 en todos los sistemas esta fracción desconocida ocupa más del 50% en la cantidad de carbono total del suelo. De igual forma, teniendo en cuenta sólo las fracciones de carbono lábil de cada sistema, en el gráfico 05 se muestra que los sistemas multiestrato 1 y el multiestrato 2, son los que tienen mayores porcentajes de CLS, los sistemas con menores cantidades de fracciones lábiles del suelo son los sistemas de pijuayo y bosque primario, esto indica que los dos sistemas con los menores porcentajes de esta

fracciones son los que tienen formas de carbono más recalcitrantes es decir más estables. Para tener un mejor resultado sobre la fracción de MOP, se multiplicó los valores obtenidos en laboratorio, por el coeficiente de 0.45, al significar que no todo lo obtenido por diferencia de pesos es carbono orgánico, sino sólo aproximadamente el 45% de todo el resto vegetal (Cambardella y Elliot, 1992)



Figura 10. Porcentajes de concentraciones de fracciones lábiles de carbono orgánico en relación al carbono orgánico total del suelo.

5. Discusión

5.1. Contenido de fracciones de carbono orgánico en los SUT evaluados.

La biomasa microbiana del suelo (BMS) es la parte viviente de la MOS, que participa como un agente de transformación, adicionando MOS y a su vez actúa como un reservorio de nitrógeno, fósforo y azufre disponible para la planta. El carbono que aporta la BMS al suelo, es lábil y representativa por la cantidad de microorganismos que pueden habitar en el sistema. La población de microorganismos va a estar en función a la disponibilidad de nutrientes para mantenerse. Para esta fracción de carbono, el sistema con mayor contenido es el multiestratos 1, que se caracteriza por tener dos especies que permanecen de forma constante en el sistema, la cobertura del suelo centrosema (*Centrosema macrocarpum*) y el tornillo (*Cedrelinga cateniformis*), de estas dos especies, la presencia de la cobertura del suelo de forma perenne permite un ingreso periódico de nutrientes al suelo, el centrosema es una cobertura conocida por su valioso aporte de carbono y nitrógeno al suelo, permitiendo que los microorganismos tengan una fuente de nutrientes que asegura su estabilidad poblacional. El detalle de este sistema radica en el contenido de arcilla en el suelo, en comparación del multiestratos 1, este suelo en la primera profundidad tiene 2.33% de arcilla y el multiestratos 2 tiene 0% de arcilla, que también incrementa la población de macrofauna, en comparación a su par el sistema multiestratos 2 (Tapia et al., 2005). La BMS es una fracción que ha sido muy estudiada y puede ser una variable más sensible que el COT, es importante tener en cuenta que su determinación está en función a las especies vegetales y en particular a la humedad del suelo, ya que estos afectan su contenido (Prasad Datta et al., 2010). Zou et al., (2005), estudió los suelos amazónicos y determinó que los ultisoles y oxisoles, son suelos que tienen mayores contenidos de BMS que los suelos más jóvenes como los inceptisoles y entisoles. Los niveles de BMS en oxisoles tuvieron un mayor porcentaje con 2.7% en comparación que los ultisoles con 1.3 %. En contraste el porcentaje de COXP en el ultisol fue mayor 11.1 % que en el oxisol con 7.6 %, lo que sugiere una correlación positiva pobre entre las fracciones. Asimismo los

niveles de carbono lábil en suelos jóvenes son mayor en comparación a los suelos antiguos, lo que indica que materiales orgánicos antiguos tienen altos niveles de asociaciones órgano-mineral. El carbono microbiano contribuye aproximadamente con 1 al 3 % del carbono total del suelo (Paul y Clark, 1996), sin embargo los resultados obtenidos en este trabajo son menores a los porcentajes propuestos.

El carbono oxidable en permanganato (COXP) es una de las fracciones más recomendables para realizar un seguimiento de las prácticas de manejo que promueven el secuestro de carbono en el suelo, esta fracción puede ser usada como indicador de calidad del suelo y se puede detectar los diferentes cambios que suceden en los suelos debido al manejo o factores ambientales. Esta fracción engloba a las fracciones de BMS y COD. El método para su determinación es sensible y se puede sugerir como un método de rutina (Culman et al., 2012). En los sistemas evaluados el sistema con mayor contenido de COXP es el sistema de pijuayo (*Bactris gasipaes*) con cobertura de kudzu (*Pueraria phaseoloides*) este sistema tiene 8 años de instalado y la presencia del kudzu de forma permanente asegura la incorporación de residuos vegetales de fácil descomposición. El sistema con el menor contenido de COXP es el bosque secundario de aproximadamente 50 años, donde la dinámica del ciclo del carbono se da forma constante, esta dinámica sugiere que el COXP, es una fracción de rápida “acción”, al ser la más disponible como fuente de nutrientes para los microorganismos y plantas (Sylvia et al., 2008). El estudio de esta fracción está muy ligada a los factores ambientales como el clima, topografía y la textura del suelo, lo que hace difícil de relacionar en forma directa los niveles de MOS de los cultivos. Hasta ahora no se ha logrado establecer un rango de niveles de COXP que permitan saber si la concentración es pobre, media u óptima. Este índice es posible en niveles regionales o entre tipos de suelos comunes (Lucas y Weil, 2012). Los valores reportados en los sistemas evaluados, son bajos en comparación a los encontrados por Culman et al. 2012, donde evaluaron 12 sistemas de manejo de tierras y obtuvieron respuestas positivas para los campos de cultivos de coberturas donde se tuvieron niveles bajos de COT y COXP en comparación de los que tuvieron mayor contenido inicialmente. Las mayores respuestas fueron vistas, donde los campos evaluados tuvieron mayor concentración de COT entre 9.4 y 16.8 g kg⁻¹ y 374 y 573 mg kg⁻¹ de la concentración de COXP, comparado con los campos donde el COT evaluado va entre 17.5 y 30 g kg⁻¹ y el COXP entre 521 y 778 mg kg⁻¹. Durante los 2 años de evaluación las respuestas fueron más fuertes en suelos de texturas finas. De igual forma los resultados de los sistemas de Yurimaguas son bajos en comparación a los reportados por Weil et al. (2003), donde la

concentración del carbono lábil fue menor en comparación al MOP con un promedio de 0.538 g kg^{-1} en un rango de 0.415 a 0.681 g kg^{-1} y una desviación estándar de 0.051 g.kg^{-1} y para el carbono lábil con 0.36 a 0.70 g C kg^{-1} suelo. Las fracciones de MOP y COXP tienen una relación positiva y estos dos indicadores responden de forma similar al manejo del suelo (Mirsky et al., 2008).

El carbono orgánico disuelto (COD) es importante para el ciclaje y transporte de los nutrientes lábiles. El sistema con mayor contenido COD es el bosque primario de formación geológica con depósitos fluviales. Esta fracción fue estudiada por Möller et al., 2005, quien reportó que la concentración del carbono orgánico disuelto en la precipitación fue de $1.7 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$, valores que se encuentran en el rango típico de carbono en parcelas forestales del trópico. Las concentraciones de COD en el bosque primario fueron altamente significantes más que otros lugares forestales. El carbono orgánico disuelto, se incrementa cuando la precipitación pasa por la copa de los árboles, esto sugiere que el lixiviado de los compuestos orgánicos de los tejidos de las plantas o la disolución de los componentes de las superficies es parte de este carbono. En los bosques tropicales, las concentraciones de COD, en la solución del suelo disminuyen fuertemente con la profundidad. Esta reducción es principalmente debido a la disminución de carbono en las fracciones hidrofóbicas y entonces la fracción hidrofílica de carbono orgánico llega a ser la dominante. La fuerte remoción del COD es atribuido a las interacciones de absorción entre el COD y los minerales del suelo, especialmente los óxidos de aluminio y hierro. Este proceso incluye la remoción preferencial de las sustancias hidrofóbicas de la solución suelo. Por ejemplo en un sistema de pasturas puede ser considerado como poco visible en lo que al impacto sobre la MOS concierne, especialmente para pastura de más de 50 años establecidas. Una fracción muy ligada al COD es determinar el carbono que es soluble en agua caliente (CSAC), así es posible diferenciar el impacto a largo plazo entre sistemas de pasturas (Möller et al., 2005). Kalbitz y Kaiser (2008) evaluaron suelos minerales de bosques y determinaron que la materia orgánica soluble es un importante contribuyente de carbono del suelo en estos suelos. Al menos entre 20 a 55 Mg C ha^{-1} del suelo mineral de los lugares evaluados derivan de la materia orgánica soluble, lo que representa entre el 19 a 50% del COT del suelo. Aunque estos valores probablemente son sobreestimados porque se desconoce la contribución de las raíces. Ghani et al. (2003), encontró que todas las correlaciones entre carbono soluble en agua caliente (CSAC) fueron significantes en $P < 0.001$. La biomasa microbiana fue fuertemente correlacionada ($R^2 = 0.84$) con los contenidos de CSAC en los suelos. Las cantidades de

CSAC extraídos en los suelos fueron de 3 a 7 veces más altas que los extraídos como biomasa microbiana. Los rangos de biomasa microbiana fueron entre 80 – 1200 $\mu\text{g C g}^{-1}$ suelo y los valores de CSAC fueron de 600 a 5400 $\mu\text{g C g}^{-1}$ de suelo. Las altas cantidades de carbono extraído puede deberse a que no sólo se extrae biomasa microbiana sino también exudados de raíces, carbohidratos solubles y aminoácidos. El CSAC no sólo extrae carbono sino también otros nutrientes. El carbono extraído por el método es altamente disponible para los microorganismos del suelo. Evaluaron sistemas de pasturas donde los resultados indican que el carbono soluble en agua caliente (CSAC), fue uno de los indicadores más sensibles entre las medidas bioquímicas del suelo que se consideraron, reflejando los cambios que se dan en la MOS causado por las diferentes prácticas de manejo del suelo. La pérdida de esta fracción puede indicar el decaimiento de nutrientes orgánicos lábiles, las reservas de biomasa microbiana y la posible degradación de la estructura del suelo. Ghani et al., (2005). Otros resultados muestran una correlación baja entre el COD y la biomasa microbiana, aun así estas siempre se encuentran en relacionadas (Weigel et al., 2011).

Para la fracción de materia orgánica particulada (MOP), el sistema con mayor contenido es también el bosque primario con 14 968 mg.kg^{-1} , con diversidad de especies, en consecuencia se tiene una mayor riqueza en desechos vegetales, esta fracción es la que más aporta en cantidad de todas las fracciones de carbono lábil en los sistemas evaluados.

La MOP al ser considerada como la fracción ligera no acomplejada que se retiene en un tamiz de 0.53 μm , va a estar en función a la tasa de descomposición del sistema. Esta fracción no es dependiente de la textura a pesar de que puede estar afectada en los diferentes gradientes de la misma, para una protección física, a diferencia de otras fracciones de carbono lábil del suelo que se incrementan con el contenido de arcilla en el suelo (Plante et al., 2006). Los contenidos de MOP encontrados en los sistemas, están dentro del rango de los resultados encontrados por Weil et al., (2003), que registró cantidades de MOP entre 1.22 a 5.86 g kg^{-1} y una desviación estándar 0.83 g. kg^{-1} . El sistema con el menor contenido de esta fracción es el bosque secundario de 31 años, que anteriormente fue un sistema productivo para arroz, yuca y plátano, este sistema reporta también un bajo nivel de BMS, lo que sugiere que la poca presencia de MOP esté afectada por las propiedades químicas y biológicas que controlan la entrada de los residuos para el suelo y los que controlan la actividad microbiana (Gregorich et al., 2006).

5.2. Análisis de clúster de la relación entre los sistemas de usos de suelo evaluados en función a sus fracciones de carbono orgánico

Al hacer el análisis de clúster se forman cuatro grupos que se pueden diferenciar por su composición vegetal y que a su vez se agrupan por las similitudes en el tipo de manejo. El primer grupo está formado por los sistemas de pijuayo, pastura degradada, pastura mejorada y palma aceitera, un segundo grupo formado por sistemas de asociaciones y bosques multiestratos 2, castaña brasilera y el bosque secundario y dos grupos independientes que son el multiestratos 1 y el bosque primario. Los resultados nos dan a conocer el comportamiento de los sistemas en función a las fracciones de carbono lábil evaluadas, a pesar de que la información disponible es escasa e inconsistente porque hay una carencia en el método para definirlo (Zou et al., 2005). Existen dos sistemas que se pueden considerar que por el contenido de sus fracciones de carbono lábil son los mejores en calidad de suelo, estos son los sistemas multiestratos 1 y bosque primario, que son justamente los sistemas que forman los grupos independientes, esto se debe a la relación de la estabilidad de los agregados que existe entre la MOS y el MOP que es posible gracias a los agentes enlazantes (hifas y raíces) y exudados de hongos como polisacáridos y glomalina, los cuales mejoran la estabilidad de los agregados. Estos compuestos orgánicos dan un grado de repelencia al agua mejorando la estabilidad del suelo. Bouajila y Gallali (2010). Cuando el COS y MOC disminuye del suelo de un bosque por la conversión a tierras agrícolas o pasturas la estabilidad de los agregados disminuye. Esto es porque se da la destrucción de los macroagregados a causa de la labranza que expone el núcleo interno del MOP facilitando su rápida descomposición por los microorganismos de esta importante reserva de carbono del suelo (Six et al., 2004).

Los dos grupos restantes, formados por sistemas asociados como el de castaña brasilera con café, el segundo multiestratos y el bosque secundario, son los que tienen los contenidos medios de fracciones de carbono lábil y tienen un manejo determinado, se puede considerar que estos sistemas aún conservan de forma estable la materia orgánica del y con respecto a la calidad de suelo es de medio a alto. El tercer grupo formado por los sistemas de manejo más intensivos como la palma aceitera, palmito, pijuayo y los sistemas de pastos, son los que tienen los menores contenidos de fracciones de carbono lábil, esto se explica porque la labranza intensiva y la actividad de pasturas dañan los agregados reduciendo la estabilidad y el contenido de la MOS. Este fenómeno es más importante en suelos de textura arenosa, porque el COS en suelos no carbonatados mejora la estabilidad de agregados. Estos

resultados refuerzan el concepto de conservación y calidad del suelo, los sistemas con mayor cantidad de carbono lábil se diferencian al ser menos degradados y al brindar un mejor servicio ecosistémico a través del suelo por la injerencia en el ciclo del carbono (Adhikari y Hartemink, 2016).

5.3. Proporción de fracciones en función del carbono orgánico total del suelo.

En la figura 12, podemos observar que la fracción lábil con mayor aporte en cantidad en todos los sistemas evaluados es la materia orgánica particulada (MOP) que en promedio tiene un 23% en los sistemas, seguido por el COXP con 1.2 % y las fracciones de COD y BMS son de concentraciones más bajas, la fracción estable de la materia orgánica tiene en promedio 75%. En el reporte de Culman et al., 2012, evaluaron doce diferentes sistemas de uso de suelos, donde encontraron que el COXP estuvo relacionado significativamente con las fracciones estudiadas (carbono orgánico particulado, carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo). A su vez determinaron que el COXP fue fuertemente relacionada a la fracción pequeña y pesada del carbono particulado que a la fracción ligera y larga lo que indica un mayor proceso y reservas de carbono de suelo lábiles más estables. La conversión de bosques naturales a áreas de cultivo va acompañado de pérdidas de COS, nutrientes y pérdida de la estructura del suelo. Estos cambios inducen significativamente a la pérdida del carbono orgánico particulado (COP), según Bouajla y Galalli (2010) esta pérdida alcanzó entre el 83 y 74 % por conversión de bosques a pastizales, pero consideran que el promedio de MOP en los bosques es de 15 % a 27 % y de 3 % a 14 % en suelos agrícolas, estos resultados se encuentran en el rango de los encontrados en los sistemas evaluados en la Amazonia peruana.

La materia orgánica particulada contiene 45 % de lignina y 18 % de celulosa (Cambardella y Elliot, 1992) y el uso de prácticas de manejo con materia orgánica incrementa el MOP, puede incrementar entre un 30 a 40 % a esta fracción que es más sensible al manejo (Wander y Marroit, 2006). La fracción recalcitrante de la MOS en todos los sistemas evaluados supera el 50 % lo que indica que existe una reserva potencial de carbono, que se irá integrando al sistema suelo con el tiempo.

Encontrar el método apropiado para separar las fracciones de carbono orgánico del suelo es la llave para estudiar como las fracciones responden a estos cambios. El carbono orgánico particulado (COP) asociados a los suelos arenosos ($> 53 \mu\text{m}$) es una fuente rica de carbono biológicamente disponible y de energía para los microorganismos. El carbono oxidable en

permanganato (COXP) tiene una alta tasa de cambio y es dependiente de las prácticas de manejo y la biomasa microbiana (BMS) puede indicar indirectamente la actividad de los microorganismos del suelo (Xiaomei et al., 2012).

6. Conclusiones

- El carbono contenido en la biomasa microbiana del suelo fue mayor en el sistema multiestratos, la cual es fuertemente dependiente de la textura del suelo, incrementándose a mayor contenido de arcilla.
- El mayor contenido del carbono oxidable en permanganato del suelo resulto el sistema con pijuayo asociado con cobertura de kudzu, siendo esta fracción más abundante en los sistemas asociados a coberturas vegetales.
- El sistema de bosque primario fue el que mayor contenido de carbono orgánico disuelto obtuvo, así como del contenido de materia orgánica particulada, las cuales son de mayor concentración en sistemas más conservados y con diversidad vegetativa.
- El buen manejo del suelo contribuye a conservar las fracciones de carbono orgánico lábil del suelo, el cual se ve reflejado en los sistemas multiestratos 1 y bosque primario.
- La materia orgánica particulada es la fracción con mayor cantidad en todos los sistemas evaluados en función al carbono total del suelo, siendo esta fracción la más sensible a los cambios de uso de suelos.

7. Recomendaciones

1. Realizar las evaluaciones en diferentes épocas del año en función a la época de lluvia.
2. Evaluar las fracciones de carbono y relacionarlas con la macrofauna del suelo.
3. Evaluar en los sistemas más representativos en COD en el suelo, haciendo colectas del agua del suelo.

8. Referencias bibliográficas

9. Alegre, J., Arévalo, L., Ricse, A., Callo-concha, D., Palm, C. 2004. Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú. En Muller, M.W., Da Gama-Rodriguez, A.C., Fontes, I.C., Fernández, M.H. *Sistemas Agrofloretais, tendencia da agricultura ecológica nos trópicos: Sustento da vida e sustento de vida*. Pp 27-32
10. Adhikari K. and Hartemink A.E. 2016. Linking soils to ecosystems services – A global review. *Geoderma* 262: 101 – 111.
11. Adisa, S.J. and Nortcliff, S. 2010. Carbon fractions associated with silt-size particles in surface and subsurface soil horizons. *Soil Science Society of America Journal* 75: 79-91.
12. Blair G.J., Lefroy R.D.B., Lisle L. (1995): Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46: 1459–1466
13. Boajilla, A. and Gallali, T. (2010). Land use effect on soil and particulate organic carbon, and aggregate stability in some soils in Tunisia. *African Journal of Agricultural Research*, 5,764-774.
14. Brady, N. C., Weil, R.R. 2008. *The nature and properties of soil*. 4ed. Prentice Hall. New Jersey. 960p.
15. Broadbent, F.E. 1953. The soil organic fraction. *Advances in Agronomy* 5: 153 – 183.
16. Chen, X., Li, Y., Mo, J., Otieno, D., Tenhunen, J., Yan, J., Liu, J., Zhang, D. 2012. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon fractions in the subtropical forest ecosystems of S China. *Plant Nutrition and Soil Science* 175: 947 – 953.
17. Cambardella, C.A. and Elliot, E.T. 1992. Particulate soil organic – matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56: 777 – 783.

18. Culman, S.W., Snapp, S.S., Freeman, M.A., Schipanski, M.E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L.E., Franzluebbers, A.J., Glover, J.D., Grandy, A.S., Lee, J., Six, J., Maul, J.E., Mirsky, S.B., Spargo, J.T. and Wander, M.M. 2012. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Science Society of America Journal* 46: 1459-1466.
19. Curtin, D., Beare, M. H., and Hernandez-Ramirez, G. 2012. Temperature and moisture effects on microbial biomass and soil organic matter mineralization. *Soil Science Society of America Journal* 76: 2005 – 2067.
20. Chantigny, M.H. 2003. Dissolved and water – extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma* 113: 357 – 380.
21. Consorcio Hidrovía Huallaga. 2005. Estudio de Navegabilidad del Río Huallaga en el tramo comprendido entre Yurimaguas y la Confluencia con el Río Marañón. Perú.
22. Collins, H.P., Rasmussen, P.E. and Douglas, C.L. 1992. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics. *Soil Science Society of America Journal* 56: 783 – 789.
23. Elliot, E.T. and Cambardella, C.A. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 34:407 – 419.
24. Evans, J.L., Fernández, I.J., Rustand, L.E. and Norton, S.A. 2001. Methods for evaluating carbon fractions in forest soils: a review. *Technical bulletin 178*. Maine University. EEUU.
25. Gema. 2011. Línea base social, EIA, Prospección sísmica 2D y perforación de cuatro pozos exploratorios – lote 130. CEPSA.

26. Ghani, A., Dexter, M. and Perrot, K.W. 2003. Hot – water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 1231-1243.
27. Ghani, A., Dexter, M., Carran, R.A. and Theobald, P.W. 2007. Dissolved organic nitrogen and carbon in pastoral soils: the New Zealand experience. *European Journal of Soil Science* 58: 832 – 843.
28. Gregorich, E.G., Beare, M.H., Mckim, U.F. and Skjemstad, J.O. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 70: 975-985.
29. Guggenberger, G. and Zech, W. 1994. Composition and dynamics of dissolved carbohydrates and lignin – degradation products in 2 coniferous forest, NE Bavaria, Germany. *Soil Biology and Biochemistry* 26: 19 – 27.
30. Guggenberger, G. and Zech, W. 1999. Soil organic matter composition under primary forest, pasture and secondary forest succession, Region Huetar Norte, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 124: 93 – 104.
31. Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C, Gody, R. 2005. Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences* 2:159 – 174.
32. Haynes, R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Advances in Agronomy*. 85: 221–268.
33. INGEMET. 1997. Cartas geológicas de la provincia de Alto Amazonas. Lima – Perú.
34. Jekinson, D.S. and Ladd, J.N. 1981. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover. *Soil Biology and Biochemistry* 5: 415 – 417.
35. Jekinson, D.S. and Powlson, D. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 8: 209 – 213.

36. Keeney, D.R. and Bremner, J.M. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agronomy Journal* 58: 498 – 503
37. Kalbitz, K. and Kaiser, K. 2008. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils. *Plant Nutrition and Soil Science* 171: 52-60.
38. Krull, E.S., Baldock, J.A., Skjemstad, J.O. 2003. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modelling carbon turnover. In McLauchan, K.K. and Hobbie, S.E. 2004. Comparison of Labile Soil Organic Matter Fractionation Techniques. *Soil Science Society of America Journal* 68:1616 – 1625.
39. Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1-22.
40. Larson, W.E., Pierce, F. J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol2. IBSRAM. Proc. 12, 2. Technical papers, International Board for Soil Research and Management, Bangkok, Thailand, Pp. 175 – 203.
41. Leinweber, P., Schulten, H.R., Korschens, M. 1995. Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long – term field experiment. *Biology and Fertility of Soils* 20: 17 – 23.
42. Lucas, S.T., Weil, R.R. 2012. Can a labile carbon test be used to predict crop responses to improve soil organic matter management? *Agronomy Journal* 104:1160-1170.
43. Maco, J. 2005. Hidrografía. Zonificación Ecológica y Económica de la Región San Martín. IIAP. Perú 44 pp.
44. Marriot, E. and Wander, M., Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. 2006 *Soil Science Society of America Journal* 70:950–959.

45. Melero, S. López – Garrido, R., Madejón, E., Murrilo, J.M., Vanderlinden, K., Ordoñez, R., Moreno, F. 2009. Long-term effects of conservation tillage on organic fractions in two soils in Southwest of Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133: 68 – 74.
46. Mirsky, S. B., Lanyon, L. E., Needlman, B.A. 2008. Evaluating soil management using particulate and chemically labile soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal* 72: 180 – 185.
47. Minpimentel. 2009. Resumen Ejecutivo del EIA del Proyecto Línea de Interconexión Eléctrica Tarapoto – Yurimaguas. Perú. 30 pp.
48. Miller, M., Dick, R.P. 1995. Thermal stability and activities of soil enzymes as influenced by crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 1161 – 1166.
49. Möller, A., Kaiser, K., Guggenberger, G., 2005. Dissolved organic carbon and nitrogen in precipitation, throughfall, soil solution and stream water of the tropical highlands in northern Thailand. *Plant Nutrition and Soil Science* 168: 649 – 659.
50. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN). 1976. Mapa Ecológico del Perú: Guía explicativa. Lima-Perú. 145p.
51. Paul, E. A., and F. E. Clark. 1996. Soil microbiology and biochemistry. Second edition. Academic Press, San Diego, California, USA.
52. Prasad Datta, S., Kumar Rattan, R. Chandra, S., 2010. Labile soil organic carbon, soil fertility and crop productivity as influenced by manure and mineral fertilizers in the tropics. *Plant Nutrition and Soil Science* 173: 715 – 726.
53. Plante, A. F., Conant, R.T., Stewart, C.E., Paustian, K., Six, J. 2006. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 287 – 296.
54. Porta, L., López Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi Prensa. España. 917p.

55. Portillo, A. 2001. Valoración Económica Total del Bosque de Protección Cordillera Escalera- San Martín. IRG. Perú. Pp. 237-284.
56. Sá, J.C. de M., Briedis, C., Caires, E.F., Navarro, J. de F, Inagaki, T.M., Boer, A., Ferreira, A. de O., Quadros Neto, C. Canalli, L. B., Santos, J.B. dos. 2011. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an Oxisol under long-term no-till. *Soil. Soil Fertility and Plant Nutrition* 76: 151-160.
57. Sylvia DM, Fuhrmann JJ, Hartel PG, Zuberer DA (2005) Principles and applications of soil microbiology, 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ
58. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denet, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates soil biota and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7 – 31.
59. Skjemstad, J.O., Swift, R.S., McGowan, J.A. 2006. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. *Australian Journal of Soil Research* 44: 255 – 263.
60. Skujins, J. 1976. Extracellular enzymes in soil. CRC. *Critical Reviews in Microbiology* 4: 383 – 421.
61. Sparling, G. 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research* 30: 195-207.
62. Sparling, G., Vojvodic – Vukovic, M., Schipper, L.A. 1998. Hot water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1469 – 1472.
63. Tagle, X. 2013. Aporte de carbono de la hojarasca en dieciséis sistemas de uso de tierra en el área de influencia de la carretera Tarapoto – Yurimaguas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.

64. Tapia – Coral S, Luizao F.J. Wendelli E., Fernandez E.C. (2005) Carbon and nutrients stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. *Agroforestry Systems* 65: 33 – 42.
65. Tirol – Padre, A., Ladha, J.K. 2004. Assessing the reliability of permanganate – oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *Soil Science Society of America Journal* 68: 969 – 978.
66. Torres, G. 2012. Zonificación ecológica y económica de la provincia de Alto Amazonas: Suelos y capacidad de uso mayor de las tierras (actualización). Convenio N°015: Secretaría General de la Comunidad Andina (SGCAN) – Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP). Iquitos. Perú.
67. UNEP - WCMC, (United Nations Environment Program – World Conservation Monitoring Centre) 2008. Carbon and biodiversity: a demonstration atlas. Eds. Kapos V., Ravilious C., Campbell A., Dickson B., Gibbs H., Hansen M., Lysenko I., Miles L., Price J., Scharlmann J.P.W., Trumper K. UNEP – WCMC, Cambridge, UK.
68. UNEP (United Nations Environment Program). 2012. The benefits of soil carbon: Managing soils for multiple economic, societal and environmental benefits. Pp. 19 – 33.
69. Vidal, I., Etchevers, J., Fisher, A. 1997. Biomasa microbiana en un suelo sometido a diferentes manejos de labranza y rotación. *Agricultura Técnica (Chile)* 4: 272 – 281.
70. Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science Society of America Journal* 37: 29 – 37.
71. Weigel, A., Eustice, T., Van Antwerpen, R., Naidoo, G., Schulz, E. 2001. Soil organics carbon (SOC) changes indicated by hot water extractable carbon (HWEC). *South African Sugar Technologists Association* 84: 210 – 222.

72. Weil, R.R., Magdoff, F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. En: Magdoff, F. and Weil, R.R. Editors, *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 1 – 43.
73. Zimmerman, M., Leifeld, J., Fuhrer, J. 2007. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 224-231.
74. Zou, X.M., Ruan, H.H., Fu, Y., Yang, X. D., Sha, L. Q. 2005. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 1923-1928.
75. Zsolnay, A, 2003. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions. *Geoderma* 113, 187-209.

ANEXO 1. Base de datos de las fracciones de carbono orgánico lábil.

Cuadro 10. Base de datos de las fracciones de carbono orgánico lábil de los sistemas evaluados

Código	T	R	S	Capa	Biomasa microbiana (mg.kg ⁻¹)	Carbono orgánico disuelto (mg.kg ⁻¹)	Materia orgánica particulada (mg.kg ⁻¹)	Carbono oxidable en permanganato (mg.kg ⁻¹)
1	y01	R1	CC	0-15	423.8667	16.7430	14800.000	602.6364
2	y01	R1	CC	15-30	423.8667	8.6930	5926.667	331.4448
3	y01	R2	CC	0-15	984.8667	14.4000	33046.667	549.4716
4	y01	R2	CC	15-30	685.6667	4.3300	33046.667	387.6768
5	y01	R3	CC	0-15	303.3556	9.7110	9476.667	508.0644
6	y01	R3	CC	15-30	303.3556	5.0250	1703.333	262.6884
7	y01	R1	CM	0-15	91.4222	8.1310	14393.333	342.6912
8	y01	R1	CM	15-30	54.0222	6.2330	9260.000	208.7568
9	y01	R2	CM	0-15	70.6444	9.2840	26153.333	438.0300
10	y01	R2	CM	15-30	66.4889	2.4810	7196.667	247.8636
11	y01	R3	CM	0-15	166.2222	4.7250	7166.667	447.2316
12	y01	R3	CM	15-30	112.2000	4.6450	3330.000	377.4528
13	y02	R1	CC	0-15	149.6000	9.5560	5213.333	446.9760
14	y02	R1	CC	15-30	149.6000	5.9850	2283.333	298.7280
15	y02	R2	CC	0-15	87.2667	10.5980	10186.667	505.2528
16	y02	R2	CC	15-30	87.2667	6.4120	3290.000	172.7172
17	y02	R3	CC	0-15	74.8000	8.4120	3676.667	254.5248
18	y02	R3	CC	15-30	20.7778	6.6700	1903.333	131.6832
19	y02	R1	CM	0-15	99.7333	8.7010	4776.667	387.4212
20	y02	R1	CM	15-30	95.5778	5.9620	1870.000	221.2812
21	y02	R2	CM	0-15	116.3556	6.3450	2553.333	302.0508
22	y02	R2	CM	15-30	116.3556	5.1090	2340.000	302.0508
23	y02	R3	CM	0-15	174.5333	13.1930	37083.333	255.8688
24	y02	R3	CM	15-30	174.5333	13.1930	32450.000	188.1312
25	y03	R1	CA	0-15	61.1111	7.6120	17780.000	462.5760
26	y03	R1	CA	15-30	61.1111	2.7590	1803.333	212.3232
27	y03	R2	CA	0-15	97.7778	10.1450	8340.000	338.3904
28	y03	R2	CA	15-30	24.4444	2.9200	1716.667	76.0416
29	y03	R3	CA	0-15	108.0444	14.8800	13296.667	356.8320
30	y03	R3	CA	15-30	108.0444	9.3820	4213.333	229.4028
31	y03	R1	BE	0-15	268.8889	3.0100	3626.667	188.1312
32	y03	R1	BE	15-30	32.5926	2.2760	2100.000	188.1312
33	y03	R2	BE	0-15	179.2593	4.2320	2430.000	47.5488
34	y03	R2	BE	15-30	97.7778	3.9270	1263.333	15.2928
35	y03	R3	BE	0-15	124.6667	12.8000	4820.000	335.9664
36	y03	R3	BE	15-30	62.3333	10.8370	3073.333	88.8084

37	y03	R1	ECA	0-15	114.0741	4.5370	7503.333	378.7104
38	y03	R1	ECA	15-30	114.0741	1.9210	4446.667	267.6960
39	y03	R2	ECA	0-15	146.6667	7.7210	8336.667	401.8272
40	y03	R2	ECA	15-30	122.2222	3.2270	2770.000	228.1824
41	y03	R3	ECA	0-15	137.1333	12.7630	13470.000	167.3028
42	y03	R3	ECA	15-30	74.8000	8.5920	7096.667	244.8036
43	y03	R1	EBE	0-15	171.1111	3.4410	2433.333	329.5200
44	y03	R1	EBE	15-30	126.2963	3.0280	1226.667	194.0448
45	y03	R2	EBE	0-15	334.0741	4.7290	2740.000	269.8464
46	y03	R2	EBE	15-30	137.1333	4.7290	1370.000	191.6256
47	y03	R3	EBE	0-15	116.3556	6.9710	5543.333	103.7124
48	y03	R3	EBE	15-30	112.2000	4.7750	2483.333	193.6332
49	y04	R1	NF	0-15	195.3111	8.2810	4856.667	90.0504
50	y04	R1	NF	15-30	74.8000	6.2140	1680.000	96.7572
51	y04	R2	NF	0-15	83.1111	13.3830	5536.667	102.7188
52	y04	R2	NF	15-30	70.6444	8.1480	5536.667	75.3948
53	y04	R3	NF	0-15	149.6000	8.3750	3203.333	162.5832
54	y04	R3	NF	15-30	149.6000	4.1310	3203.333	25.4664
55	y05	R1	NF	0-15	114.8889	13.0730	9613.333	416.4480
56	y05	R1	NF	15-30	114.8889	9.2210	7050.000	251.7588
57	y05	R2	NF	0-15	160.8444	18.2530	14316.667	394.8372
58	y05	R2	NF	15-30	160.8444	9.3060	9466.667	242.0712
59	y05	R3	NF	0-15	402.1111	15.0370	19413.333	576.1692
60	y05	R3	NF	15-30	402.1111	12.8630	29946.667	244.8036
61	y06	R1	BG	0-15	228.5556	5.2700	8176.667	459.3624
62	y06	R1	BG	15-30	74.8000	3.6310	6506.667	324.7992
63	y06	R2	BG	0-15	187.0000	11.8400	9086.667	501.2208
64	y06	R2	BG	15-30	74.8000	11.8400	4116.667	366.9144
65	y06	R3	BG	0-15	228.5556	2.4420	10120.000	518.1696
66	y06	R3	BG	15-30	37.4000	1.3500	3333.333	314.5272
67	y06	R1	PP	0-15	62.3333	6.8690	5176.667	487.8672
68	y06	R1	PP	15-30	16.6222	5.1380	3426.667	316.0680
69	y06	R2	PP	0-15	124.6667	7.0920	10073.333	504.8160
70	y06	R2	PP	15-30	112.2000	3.4830	7100.000	396.9600
71	y06	R3	PP	0-15	216.0889	2.3300	10080.000	517.3992
72	y06	R3	PP	15-30	70.6444	2.5490	3353.333	324.2856
73	y07	R1	AC	0-15	274.2667	7.0100	12333.333	386.9448
74	y07	R1	AC	15-30	137.1333	5.4440	12333.333	221.5656
75	y07	R2	AC	0-15	207.7778	9.0610	13340.000	470.9184
76	y07	R2	AC	15-30	41.5556	5.6990	6330.000	441.6432
77	y07	R3	AC	0-15	349.0667	6.9170	11333.333	436.2504
78	y07	R3	AC	15-30	349.0667	5.3220	2843.333	188.9520
79	y08	R1	BZ	0-15	233.6074	8.1550	5260.000	277.8048
80	y08	R1	BZ	15-30	191.4815	8.1550	5260.000	457.8216
81	y08	R2	BZ	0-15	340.8370	3.7660	12780.000	470.1480

82	y08	R2	BZ	15-30	149.3556	3.0900	5463.333	261.8832
83	y08	R3	BZ	0-15	329.3481	6.9490	18943.333	592.3848
84	y08	R3	BZ	15-30	70.6444	1.9170	3643.333	236.4600
85	y09	R1	BG	0-15	99.7333	4.2890	12096.667	415.1928
86	y09	R1	BG	15-30	20.7778	3.6930	2350.000	191.0064
87	y09	R2	BG	0-15	319.9778	4.8900	11460.000	555.9192
88	y09	R2	BG	15-30	319.9778	4.8900	4896.667	395.1624
89	y09	R3	BG	0-15	128.8222	3.0790	7100.000	346.3848
90	y09	R3	BG	15-30	128.8222	2.8720	7100.000	310.7232
91	y09	R1	EBG	0-15	253.4889	5.3910	7060.000	288.3336
92	y09	R1	EBG	15-30	241.0222	3.6950	1383.333	131.1720
93	y09	R2	EBG	0-15	224.4000	3.7310	5243.333	282.0816
94	y09	R2	EBG	15-30	224.4000	3.6550	1380.000	124.2720
95	y09	R3	EGB	0-15	319.4074	4.2640	4456.667	288.2592
96	y09	R3	EGB	15-30	319.4074	4.2640	4240.000	100.4040
97	y10	R1	EGB	0-15	339.3704	4.4870	11753.333	399.7368
98	y10	R1	EGB	15-30	291.4593	4.4870	8026.667	152.3520
99	y10	R2	EGB	0-15	119.7778	8.1840	9886.667	414.0576
100	y10	R2	EGB	15-30	119.7778	6.6720	5386.667	177.3432
101	y10	R3	EGB	0-15	411.2370	4.9000	4683.333	256.2480
102	y10	R3	EGB	15-30	411.2370	4.5520	2763.333	146.7360
103	y10	R1	PP	0-15	339.3704	4.8500	7776.667	426.9744
104	y10	R1	PP	15-30	339.3704	3.6760	3563.333	235.1880
105	y10	R2	PP	0-15	115.7852	5.1060	7330.000	257.3712
106	y10	R2	PP	15-30	115.7852	3.9870	1920.000	102.9312
107	y10	R3	PP	0-15	91.8296	5.7190	5403.333	287.1360
108	y10	R3	PP	15-30	91.8296	5.7190	2093.333	106.5816

ANEXO 2. Fotografías de los diez sistemas de uso de suelos evaluados en la provincia de Alto Amazonas.



Figura 11. Y1: Sistema multiestratos 1, estación experimental INIA – San Ramón.



Figura 12. Y2: Sistema multiestratos 2, estación experimental INIA – San Ramón.



Figura 13. Y3: Sistema de castaña brasilera y café, estación experimental INIA – San Ramón.



Figura 14. Y4: Bosque secundario, estación experimental INIA – San Ramón.



Figura 15. Y5: Bosque primario, estación experimental INIA – San Ramón.



Figura 16. Y6: Sistema de pijuayo asociado a kudzu como cobertura vegetal, estación experimental INIA – San Ramón.



Figura 17. Y7: Sistema de pastura degradada, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.



Figura 18. Y8: Sistema de pastura mejorada, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.



Figura 19. Y9: Sistema de palmito, propietario Sr. Robin Sánchez Marin.



Figura 20 Y10: Sistema de Palma Aceitera, asociada con kudzu como cobertura vegetal, propietario Sr. Teófilo Paima Isuiza.

ANEXO 3. Fotografías del muestreo de suelos y análisis en el laboratorio de suelos.



Figura 21. Muestreo de suelos para densidad aparente, en el sistema de multiestratos 1.



Figura 22: Análisis de carbono orgánico disuelto en agua en el Analizador Total de Carbono (TOC – L).