

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA

CARRERA DE INGENIERÍA AGRARIA



TESIS DE INVESTIGACIÓN

**“MOVIMIENTO DEL CARBONO Y NITROGENO Y CAPTURA DEL
CO₂ EN CINCO SUELOS CON VEGETACIÓN FORESTAL,
AGROFORESTERÍA Y AREA DEGRADADA EN LA PROVINCIA DE
RIOJA-SAN MARTÍN”**

EJECUTORA:

Bach. SYCHELLES BUENO BENANCIO

ASESOR:

Dr. HONORIO ELOY MUNIVE JAUREGUI

HUACHO – 2016

DEDICATORIAS

A Dios que es fortaleza y horizonte de mi vida, pues al lado de Él aprendí a seguir adelante sin desmayar en los problemas, encarando las adversidades sin perder la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mis padres Demóstenes Bueno y Yolanda Benancio, quienes me formaron en valores y me apoyaron constantemente para salir adelante, sobre todo en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, Junior, Roxana, Alcides y Chelyabinsk, que siempre han estado conmigo, brindándome su invaluable y constante apoyo.

AGRADECIMIENTOS

- A mi asesor Dr. Honorio Eloy Munive Jáuregui, por su esfuerzo, dedicación, visión crítica en muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión, por sus consejos, su espíritu de investigador, además de sus conocimientos, experiencia paciencia y motivación, que me ha permitido terminar mi tesis con éxito. Mi afecto y reconocimiento muy especial.
- Al Ingeniero Juan Ignacio Pastén Monárdez, Decano de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, por confiar en mí persona.
- Al Doctor Gian Battista Bolis, por darme la oportunidad de estudiar y formar parte del equipo profesional de la Universidad Católica Sedes Sapientiae.
- A las innumerables personas que han hecho de mí lo que soy, pero sólo nombraré algunas que marcaron mi vocación en la Ingeniería Agraria, dentro de ellos:
 - A mis profesores de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, con sede en Huacho.
 - Al Proyecto Especial Alto Mayo, Dirección de Desarrollo Agrario, por facilitarme las instalaciones y los equipos de su Laboratorio de Análisis de Suelos;
 - Al Ingeniero Carlos Hugo Egoávil de la Cruz y al Técnico de Laboratorio Cleoder Ruiz Flores por el apoyo en la ejecución del análisis de las muestras de suelos de mi trabajo experimental;
 - A Miguel y Lupe, por compartir momentos significativos en mi vida y siempre estar disponible a escucharme, ayudándome en cualquier circunstancia a pesar de la distancia. Muchas gracias y que Dios los bendiga.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Dedicatorias	02
Agradecimientos	03
Resumen	10
Abstract	12
INTRODUCCIÓN	14
I: REVISIÓN DE LITERATURA	16
1.1 Antecedentes	16
1.2. Bases Teóricas	22
1.2.1. El Sistema Suelo	22
1.2.1.1. Manejo del Sistema Suelo	23
1.2.2. Propiedades del Suelo	24
1.2.2.1. Textura	24
1.2.2.2. Estructura del Suelo	26
1.2.2.3. Consistencia del Suelo	28
1.2.2.4. Color del Suelo	29
1.2.2.5. pH	31
1.2.2.6. Materia Orgánica del suelo	32
1. 2.2.7. El Coloide del Suelo	37
1.2.3. Degradación de Suelos	40
1.2.4. Carbono en el Suelo	42
2.4.1. Ciclo de Carbono	43
2.4.2. Pérdida de Carbono	45
1.2.5. El nitrógeno en el Suelo	50
1.2.5.1. Ciclo del Nitrógeno	50

1.2.5.2. Compuestos Nitrogenados Inorgánicos	52
1.2.5.3. Compuestos Nitrogenados Orgánicos	52
1.2.5.4. El Humus del Suelo	53
1.2.6. La Deforestación	54
1.2.6.1. Efectos Locales	59
1.2.6.2. Efectos Regionales	62
1.2.6.3. Efectos Globales	62
1.2.7. Agroforestería	62
1.2.7.1. Características de los sistemas Agroforestales	63
1.2.7.2. Potencialidades de la Agroforesteria	64
1.2.7.3. Clasificación de los Sistemas Agroforestales	66
II. MATERIALES Y MÉTODOS	75
2.1. Diseño de la Investigación	76
2.1.1. Lugar y Fecha de Ejecución	76
2.1.2. Población y Muestra	79
2.1.3. Tipo y Método de Investigación	80
2.1.4. Diseño de la Investigación	80
2.1.5. Descripción de la Investigación de Campo	80
2.1.5.1. Fase Preliminar	81
2.1.5.2. Fase de Campo	81
2.1.5.3. Fase de Laboratorio	82
2.1.5.4. Fase de Gabinete	84
2.1.6. Identificación de Variables	84
2.2. Materiales y Equipos	85
2.1. Material Cartográfico	85
2.2. Material de Campo	85
2.3. Equipos	85
2.3. Material de Gabinete	85
2.3. Refinamiento de Datos	86

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES	87
3.1. Descripción de los Perfiles Estudiados	87
3.1.1. Calicata 01: Bosque de Capirona (BC)	87
3.1.2. Calicata 02: Bosque de Eucalipto (BE)	89
3.1.3. Calicata 03: Agroforestería: Eucalipto+Café (E+C)	91
3.1.4. Calicata 04: Agrodorestería: Cedro de la India+Café (CI+C)	92
3.1.5. Calicata 05: Área Degradada (AD)	94
3.2. Resultados del Análisis Físico-Mecánico y Químico del Suelo	96
3.2.1. Textura	96
3.2.2. Reacción del Suelo (pH)	97
3.2.3. Densidad Aparente	99
3.2.4. Conductividad Eléctrica	101
3.2.5. Carbonatos	102
3.2.6. Materia Orgánica	103
3.2.7. Nitrógeno Total	105
3.2.8. Carbono Orgánico	107
3.2.9. Dióxido de carbono	108
IV. CONCLUSIONES	111
V. RECOMENDACIONES	115
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
TERMINOLOGÍA	125
APÉNDICES	128

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidad de Dióxido de Carbono Capturado por diferentes tipos de Bosques	20
Tabla 2. Concentración de Hidrogeniones y su relación con el pH del Suelo	31
Tabla 3. La Deforestación en algunos Departamentos del Perú	57
Tabla 4. Datos Meteorológicos del Distrito de Nueva Cajamarca	77
Tabla 5. Sistemas en Estudio y Puntos de Muestreo	80
Tabla 6. Mensuración de la Variables en Estudio	83
Tabla 7. Variables en Estudio	84
Tabla 8. Refinamiento de Datos	86
Tabla 9. Resultados del Análisis de la Textura del Suelo	96
Tabla 10. Resultados del Análisis de la Reacción del Suelo (pH)	98
Tabla 11. Resultados del Análisis de la Densidad Aparente	100
Tabla 12. Resultados del Análisis de la Conductividad Eléctrica	101
Tabla 13. Resultados del Análisis de Carbonatos	102
Tabla 14. Resultados del Análisis de la Materia Orgánica	104
Tabla 15. Resultados del Análisis del Nitrógeno Total	106
Tabla 16. Resultados del Análisis del Carbono Orgánico	107
Tabla 17. Resultados de la Captura del Dióxido de Carbono	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Almacenamiento de Carbono Total en diferentes depósitos en los Aguajales en la Cuenca del Rio Aguaytía	21
Fig. 2. Relación de la Textura y la Materia Orgánica con las Propiedades Físicas y Químicas	25
Fig. 3. Ciclo del Carbono	44
Fig. 4. Ciclo del Nitrógeno	51
Fig. 5. Fotografía del Perfil del Suelo y el Paisaje del Bosque de capirona	87
Fig. 6. Fotografía del Perfil del Suelo y el Paisaje del Bosque de Eucalipto	89
Fig. 7. Fotografía del Perfil del Suelo y el Paisaje del Sistema Agroforestería café + eucalipto	91
Fig. 8. Fotografía del Perfil del Suelo y el Paisaje del Bosque del Sistema Agroforestería café + cedro de la india	92
Fig. 9. Fotografía del Perfil del Suelo y el Paisaje del Área Degradada	94
Fig. 10. Evaluación de la Reacción del Suelo	99
Fig. 11. Evaluación de la Densidad Aparente	100
Fig. 12. Evaluación de la Conductividad Eléctrica	101
Fig. 13. Evaluación del Contenido de Carbonatos	103
Fig. 14. Evaluación de la Materia Orgánica	105
Fig. 15. Evaluación del Nitrógeno Total	106
Fig. 16. Resultados de la Evaluación del Carbono Orgánico	108
Fig. 17. Resultados de la Captura del Dióxido de Carbono	110

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Parámetros para la Interpretación de las Características generales de los suelos	128
Apéndice 2. Hoja de Descripción de Perfiles	135
Apéndice 3. Plano de Ubicación y Puntos de Muestreo	136
Apéndice 4. Fichas de Descripción de Perfiles en el Campo	137
Apéndice 5. Resultados del Análisis de Caracterización de los Suelos	142
Apéndice 6. Cálculo de CO ₂ capturado en los Suelos en Estudio	143
Apéndice 7. Fotografías de las Fases de Campo y de Laboratorio	144

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en los distritos de Segunda Jerusalén y Nueva Cajamarca de la provincia de Rioja en la región San Martín, con la finalidad de conocer la captura del dióxido de carbono (CO₂) en los suelos a partir de la biomasa producida por cinco sistemas de uso del suelo: 1) Bosque de “capirona” (*Calycophyllum spruceanum*) (BC), 2) Bosque de “eucalipto” (*Eucalyptus torelliana*) (BE), 3) sistema agroforestal “eucalipto” más “café” (*Coffea arabica*) (E+C), 4) sistema agroforestal “cedro de la india” (*Acrocarpus fraxinifolius*) más “café” (CI+C), y 5) un área degradada en abandono (AD). Para determinar el stock de carbono en el suelo se construyeron calicatas en cada lugar de evaluación y el estudio se hizo a nivel de tres profundidades: de 0-20 cm, 20-40 cm y de 40-60 cm.

Los suelos en estudio son azonales con escaso desarrollo pedogenético, con perfiles A(B)C en los Bosque de “capirona” (BC) y de “eucalipto” (BE), y perfiles A/C en los suelos con “cedro de la India” más “café” (CI+C), “eucalipto” más “café”) (E+C) y en el área degradada (AD), respectivamente. Taxonómicamente son Inceptisols y por capacidad de uso mayor son tierras forestales de mediana aptitud (F2es), los bosques de “capirona” y de “eucalipto”, de baja aptitud agrícola (A3sw) las tierras con agroforestería: “cedro de la India” + “café” (CI+C) y “eucalipto” + “café” (E+C) y el área degradada (AD) que soporta diversas plantaciones prácticamente abandonadas.

Los suelos son moderadamente profundos, de topografía moderadamente empinada, con buen drenaje a excepción del área degradada, con moderada erosión superficial, exentos de pedregosidad superficial y con relieve plano ligeramente ondulado. La textura es variable de franco limosa en las capas superficiales de los suelos con bosque de “capirona”, agroforestería con “eucalipto” + “café” y “cedro de la india” + “café”, franca en el suelo con bosque de “eucalipto” y en las capas subyacentes de los anteriores suelos, y textura arcillosa en el área degradada. El pH varía de neutro (bosque de capirona) a moderadamente ácido (bosque de eucaliptos y área degradada) y moderadamente básico

(agroforestería de “eucaliptos” más “café” y de “cedro de la india” más “café”). La densidad aparente varía de 1,35 a 1,37 g.cm⁻³ (bosque de “capirona” y área degradada), de 1,37 a 1,52 g.cm⁻³ en los bosques de eucaliptos, agroforestería con “eucalipto” + “café” y de “cedro de la india” + “café”. La conductividad eléctrica oscila de 0,003 a 0,006 dS.m⁻¹ indicando que no existe problema alguno de salinidad. El contenido de carbonatos está en niveles medios (de 10 a 11 g.kg⁻¹) solo en los suelos con agroforestería.

El contenido de materia orgánica es bajo (< 20 g.kg⁻¹) en la capa superficial en los suelos con agroforestería (“eucalipto” + “café” y “cedro de la India” + “café”) y medios (20 a 40 g.kg⁻¹) en los suelos con bosque de “capirona”, bosque de “eucalipto” y área degradada. El contenido de nitrógeno total es bajo en los cinco perfiles y en las tres profundidades estudiadas (< 1,0 g.kg⁻¹). El contenido de carbono orgánico es medio en el bosque de “capirona”, en el bosque de “eucalipto” y en el área degradada (de 11,6 a 23,2 g.kg⁻¹), mientras que en los dos suelos con “eucalipto” + “café” y “cedro de la india” + “café”, es bajo o pobre (< 11,6 2 g.kg⁻¹).

En base a las propiedades descritas y los resultados del análisis de suelos se determinó que el bosque de “capirona” que tiene un perfil más profundo y constituido por plantas de un desarrollo medio, es el que retiene mayor cantidad de CO₂ almacenado en el suelo con 299,152 t.ha⁻¹, seguido por las asociaciones “eucalipto” + “café” con 267,391 t.ha⁻¹ y “cedro de la india” + “café” con 265,320 t.ha⁻¹, luego se ubica el bosque de “eucalipto” con 229,492 t.ha⁻¹, ocupando el último lugar el área degradada con solo 139,951 t.ha⁻¹. Estos resultados muestran claramente la gran importancia que tienen los sistemas de uso del suelo con vegetación de bosque y con agroforestería con relación a la captura de CO₂.

Palabras clave: Agroforestería, captura del dióxido de carbono, calentamiento global, área degradada, perfil del suelo, suelos azonales.

ABSTRACT

This research was carried up in the Segunda Jerusalen and Nueva Cajamarca districts, from Rioja province in the San Martin region, in order to know the capture of carbon dioxide (CO₂) in soils from the produced biomass by five systems of land use: 1) "Capirona" (*Calycophyllum spruceanum*) forest (BC), 2) "eucaliptos" (*Eucalyptus torelliana*) forest (BE), 3) Agroforestry system "eucaliptos" + "coffee" (*Coffea Arabica*) (E+C), 4) Agroforestry system cedro de la India" (*Acrocarpus fraxinifolius*) plus "coffee" (CI+C) and, 5) A degraded area abandoned (AD). To determine the stock of carbon in the soil pits were made at each evaluation site and the study was done at the level of three depths: 0-20 cm, 20-40 cm, and 40-60 cm.

The soils under study are azonal with little pedogenic development with A(B)C profiles in the "capirona" (BC) and "eucaliptos" (BE) forests, and profiles A/C in soils with "cedro de la India " + "coffee" (CI+C), "eucaliptos" plus "coffee" (E+C), and in the degraded area (AD), respectively. Taxonomically these soils are Inceptisols and from de land capability are forest land with medium suitability (F2es), in the "capirona" and "eucaliptos" forest, low agricultural suitability (A3sw) lands with agroforestry: "cedro de la India " + "coffea" (CI+C) and "eucalipto" + "coffee" (E+C) and the degraded area (AD), which supports various plantations virtually abandoned.

The soils are moderately deep, with moderately steep topography, well drained except the degraded area, with moderate surface erosion, stoniness free surface and slightly wavy flat relief. The texture is variable from silty loam in the surface layers in the "capirona" soils, agroforestry with "eucaliptos" + "coffee", and "cedro de la India " + "coffee", loam on the "eucaliptos" forest, and clayey in the degraded area. The pH varies from neutral ("capirona" forest) to moderately acid ("eucaliptos" forest and degraded area) and moderately basic (agroforestry "eucalyptus" plus "coffee" and "cedro de la India" plus

"coffee"). The bulk density varies from 1.35 to 1.37 g.cm⁻³ ("capirona" forest and degraded area) to 1.37 to 1.52 g.cm⁻³ in eucaliptos forests, agroforestry with "eucaliptos" + "coffee", and "cedro de la India" + "coffee". The electric conductivity ranges from 0.003 to 0.006 dS.m⁻¹, showing there is not salinity problem. The carbonate content is at moderate levels (10 to 11 g.kg⁻¹) only in soils with agro-forestry systems.

The organic matter content is low (<20 g.kg⁻¹) in the surface layer in soils with agroforestry ("coffee" + "cedro de la India") and midium (20 to 40 g.kg⁻¹) in the "capirona" and "eucaliptos" forest soils, and in the degraded area. The total nitrogen content is low in the five profiles studied in the three depths levels (<1.0 g.kg⁻¹). The organic carbon content is medium in "capirona" and de "eucalptos" forest, and in the degraded area (from 11.6 to 23.2 g.kg⁻¹), whereas in the two soils with "eucalipto" + "coffee", and "cedro de la India" + "coffee", is low or poor (<11.6 2 g.kg⁻¹).

Based over the described properties and the soil analysis results, it was determined that the "capirona" forest has a deeper profile, with medium developed plants, which retains and stored more CO₂ in the soil with 299.152 t.ha⁻¹, followed by the "eucalyptus" + "coffee" association with 267.391 t ha⁻¹ and the "cedro de la India" + "coffee" associations with 265.320 t ha⁻¹, then the "eucalyptus" forest with 229.492 t ha⁻¹, occupying the last place with only 139.951 t.ha⁻¹ the degraded area. These results clearly show the great importance of land use systems with forest vegetation and agroforestry in relation to CO₂ capture.

Keywords: Agroforestry, capture carbon dioxide, global warming, degraded area, soil profile, azonal soil.

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes desafíos ambientales en la actualidad es el cambio climático ya que sus efectos son globales involucrando muchos aspectos interconectados del sistema climático y sus impactos son múltiples y compuestos debido a las complejas estructuras sociales y económicas a nivel local, nacional e internacional. El incremento de los valores en los indicadores del cambio climático incluyen la generación de los gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO₂); por eso el análisis de la reserva o “stock” de carbono que almacenan los ecosistemas forestales, como los bosques y los suelos en sus diferentes componentes, es de suma importancia, ya que son considerados como los más importantes sumideros de carbono.

La preocupación de la comunidad científica con respecto al efecto invernadero está en aumento debido al constante incremento de los espacios depredados, la expansión de la agricultura industrializada, la tala indiscriminada de los bosques, entre otros muchos aspectos que son causados por la actividad antropogénica. La demanda del mercado económico está en expansión y está causando efectos irreversibles en los sistemas de la Tierra.

La masiva explotación forestal en la amazonia peruana ha generado un desequilibrio y deterioro de los ecosistemas naturales, muy especialmente en el sistema edáfico, siendo notoria la presencia de zonas extensas donde prácticamente no existen especies forestales nativas relevantes por su importancia maderera y estas por el pasar del tiempo, se han convertido en bosques secundarios formadas por una diversidad antropizada de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, que por supuesto son valiosos en el ecosistema pero con un impacto negativo en la conservación integral del componente suelo, debido a que no brindan la protección necesaria en el aumento de la degradación de este recurso.

En la provincia de Rioja, de la región San Martín, en la actualidad existen muchas áreas reforestadas con especies exóticas como: *Eucalyptus torelliana* y *Eucalyptus saligna*, que han sido introducidas por instituciones públicas y privadas; así como con especies nativas como la “Capirona” *Calycophyllum spruceanum* y el “tornillo” *Cedrelinga cateniformis*, plantadas en programas de reforestación y de agroforestería asociados principalmente con “café” (*Coffea arabica*), observándose poca vegetación herbácea y arbustiva que no contribuye al aumento de la población de animales silvestres, facilitando la erosión de suelos por escorrentía, con una excesiva acumulación de humedad, con un mínimo desarrollo del perfil del suelo, entre otros impactos negativos.

La producción forestal debido a la alta producción de biomasa como un componente sumamente importante en la captura del dióxido de carbono (CO₂), favorece el aumento de carbono en el suelo y de otros productos de transformación de la biomasa que pueden mejorar muchas propiedades del sistema edáfico, como son la estructura, permeabilidad y capacidad retentiva de agua, en consecuencia los árboles juegan un rol sumamente importante en el mejoramiento de la calidad del suelo y como consecuencia se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo es el movimiento del carbono y del nitrógeno y la captura del dióxido de carbono (CO₂) por el suelo con plantaciones forestales exóticas, nativas con agroforestería comparadas con un área degradada en la provincia de Rioja de la región San Martín?

Para responder esta incógnita el presente estudio tiene la finalidad de:

Caracterizar los suelos con bosques con especies nativas, exóticas y agroforestería comparados con un área degradada de recuperación natural.

Conocer el movimiento del carbono y el nitrógeno a nivel de tres profundidades del perfil del suelo en bosques ya establecidos, suelos con agroforestería y área de recuperación natural.

Finalmente se estimó la cantidad de carbono retenido para calcular los niveles de dióxido carbónico (CO₂) capturado por los suelos considerados en el presente estudio.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1. Antecedentes

Schroeder (1994) llevó a cabo una evaluación del almacenamiento del carbono (C) en diferentes ecorregiones del Mundo, concluyó que en las áreas forestales tropicales, se puede obtener un almacenamiento de 21 a 50 t.ha⁻¹ de C en zonas subhúmedas y húmedas, respectivamente, con ciclos de corte de ocho o cinco años, mucho más cortos que en los bosques. En estos cálculos no se incluyó el carbono del suelo; sin embargo las raíces, por si solas, podrían incrementar esos valores en un 10 por ciento.

En los principales sistemas agroforestales se podría mantener el carbono original presente en el ecosistema del bosque. Por ejemplo, en un período de 10 años, bajo cacao y bajo “cacao”/*Erythrina*, se obtuvieron aumentos de 10 y 22 t.ha⁻¹, respectivamente (Fassbender *et al.*, 1991). La agrosilvicultura, mediante la asociación de árboles con cultivos o pasturas puede representar una alternativa sostenible a la deforestación y a la agricultura de rozo, tumba y quema. Esta práctica tiene un gran potencial para la captura de carbono en tierras de cultivos (Sánchez *et al.*, 1999).

Según Briceño y Pacheco (2002), los contenidos de carbono, nitrógeno y ácidos húmicos decrecen drásticamente con la profundidad del suelo. En el estudio que realizaron con relación a este tema, encontraron que la asociación de las especies forestales con *Euterpe* o *Musa*, resultan en una mayor recuperación del carbono orgánico. El contenido de nitrógeno del suelo en un terreno de regeneración natural y en

las especies forestales solas o asociados, son significativamente menores que en el bosque secundario, lo que indica que con la instalación de tratamientos con árboles se produce una disminución del nitrógeno total del suelo, debido a que este elemento es particularmente producido por el tipo de biomasa. Estos mismos autores, demostraron que el contenido de ácidos húmicos del suelo, con tratamientos con especies forestales son similares pero menores en suelos que soportan bosques secundarios y en áreas degradadas, debido probablemente a que la fracción humus es el componente más estable de la materia orgánica.

Pizzumo (2003) en un estudio realizado en el Parque Nacional de Caazapá (México), utilizando 22 familias botánicas, de las cuales las Fabaceae con 9 especies, seguida por la familia Meliaceae con 5 especies, Prutaceae con 4 especies, Lauraceae, Moraceae y Sapindaceae con 3 especies cada una, Boraginaceae, Myrtaceae y Sapteceae con 2 especies, y las demás con sólo una especie, cubriendo en total una superficie de 16 000 ha, de los cuales el bosque Denso Semideciduo estacionalmente saturado ocupa 6 436,8 ha, seguido del bosque Abierto Semideciduo subhúmedo con 4 006,4 ha, y el bosque de Galería con 3 894,4 ha. Luego de una serie de cálculos determinó que el bosque de Galería posee el mayor stock de carbono orgánico con 308,15 t.ha⁻¹, seguido del bosque Abierto Semideciduo subhúmedo con 192,2 t.ha⁻¹ y por último el bosque Denso Semideciduo estacionalmente saturado con 151,3 t.ha⁻¹. Estos resultados convertidos a dióxido de carbono fueron de 1 192,98; 715,79 y 554,45 t.ha⁻¹ de CO₂ capturado, respectivamente.

Según Lapeyre *et al.*, (2004) en un trabajo de investigación realizado en la región San Martín con la finalidad de monitorear la captura de carbono después de un cambio de uso del suelo (corta de foresta para instalación de cultivos), evaluaron tierras con bosque primario, secundario, sistemas agrícolas, agroforestales y pasturas, sobre la determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea en diferentes sistemas de uso de tierra, determinaron que el carbono total en el bosque primario fue de 485 t.ha⁻¹, superado las reservas del bosque secundario de 50 años y del bosque descremado de 20

años. Con relación al bosque primario se observa una reducción de reserva en más de 50 por ciento del bosque secundario de 50 años (234 t.ha^{-1} de C). El bosque descremado de 20 años perdió más del 80 por ciento de reserva (62 t.ha^{-1} de C). El nivel de reserva de carbono en la biomasa de hojarasca de los sistemas boscosos no es significativo al comparar con la biomasa aérea; sin embargo, es significativo para sistemas agroforestales. Los sistemas agroforestales (“café”-“guaba”), (cacao-especies forestales) secuestran entre 19 a 47 t.ha^{-1} de C, dependiendo de la edad, cantidad de especies y tipo de suelo. Los sistemas agrícolas (“maíz” y “arroz”) capturan 5 t.ha^{-1} de C, pero generan fugas de gases de efecto invernadero cuando se usan agroquímicos y quema de rastrojos.

Según Concha *et al.*, (2007) en estudios realizados en la determinación de reservas de carbono en la biomasa aérea de 6 sistemas agroforestales (*Theobroma cacao*) con especies maderables y frutales de 5,12 y 20 años de edad en la Región San Martín, los resultados en captura de carbono en cada sistema varían desde 26.2 t.ha^{-1} . Para parcelas con sistemas de agroforestales de 5 a 12 años varía entre 45.07 t.ha^{-1} ; así mismo la captura de carbono en biomasa de árboles vivos osciló desde 12.09 hasta 35.5 t.ha^{-1} . Los sistemas agroforestales de 12 y 20 años representan el 66 por ciento de los sistemas que presentan reserva de carbono por debajo de los 30 t.ha^{-1} . El sistema de cacao de 12 años asociado con “guaba” y “pucaquiro” (maderable de rápido crecimiento), “papaya” y “café” presentó mayor cantidad de carbono secuestrado.

Ibrahim *et al.*, (2007), en un estudio realizado en tres países diferentes (Colombia, Costa Rica y Nicaragua) en el tema de almacenamiento de carbono en el suelo (COS) y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos, llegaron a la conclusión que al nivel de suelo, las pasturas degradadas presentaron menores valores de carbono orgánico a 1,0 m de profundidad en Costa Rica y Nicaragua, y no se encontraron diferencias significativas de COS en los demás usos de la tierra evaluados. En Colombia, a nivel de suelos no se encontraron diferencias significativas de COS en los usos de la tierra analizados. Al nivel de suelo, las pasturas degradadas presentaron

menores valores de COS a 1 m de profundidad en Costa Rica y Nicaragua, y no se encontraron diferencias significativas de COS en los demás usos de la tierra evaluados.

Buendía (2009) manifiesta que existe mucha desorientación pública sobre el uso de especies forestales apropiadas en selva alta. Tensiones vigentes entre las opciones de introducción de plantas exóticas en proyectos de reforestación con fines económicos y la reintroducción de especies nativas dentro de un proceso de regeneración del ecosistema, con el deterioro progresivo de los procesos sustentables de vida (suelo, agua, bosque y biodiversidad). Al referirse sobre la conservación de la biodiversidad indica que en Oxapampa existe una pérdida de diversidad biológica (hábitat y especies), causada principalmente por la extracción forestal informal y la agricultura migratoria (quema de boques), depredación selectiva y comercio ilegal de especies forestales. Asimismo, sostiene que existe un sobre uso de los recursos naturales con un inadecuado aprovechamiento de los bosques debido a la extracción masiva de productos silvestres, sin un manejo sostenible, mal uso de las tierras de protección, prácticas agrícolas inadecuadas y uso indiscriminado de pesticidas.

Palacín (2011) al hacer un estudio sobre el movimiento del carbono, nitrógeno y humus en el sistema edáfico con plantaciones forestales, bosque secundario y área de regeneración natural en el distrito de Chontabamba en Oxapampa, concluyó que los suelos bajo bosque de “eucaliptos” y “ulcumano” y bosque secundario, son lo que mayores cantidades de carbono, nitrógeno y humus han incorporado al suelo, mientras que en el suelo bajo bosque de “pinos” la incorporación es mucho menor, inclusive es superado por el suelo del sistema agrícola degradado, recomendando que para futuros estudios similares, sería necesario considerar el efecto de la vegetación del sotobosque que está conformada por muchas especies que son diferentes en cantidad y desarrollo.

El MINAG (2012) realizó un estudio con el objetivo de estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa del bosque de la Comunidad Nativa Eseésja de Infierno (Madre de Dios), considerando el C retenido en el reservorio aéreo, en el reservorio

subterráneo, en la hojarasca y en el sistema suelo. Las parcelas evaluadas en este estudio fueron 67, de las cuales 50 fueron muestreadas en áreas de cobertura boscosa y 17 en bosques secundarios de diferentes años (5-10, 10-20 y más de 20 años).

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada tipo de reservorio se concluyó que el bosque de aguajal mixto almacenó la mayor cantidad de carbono frente a los demás reservorios.

Tabla 1

Cantidad de dióxido de carbono capturado por diferentes tipos de bosques

ESTRATOS	CARBONO (t.ha⁻¹)	SUPERFICIE (ha)	TOTAL C (t)	TOTAL CO₂ (t)
Aguajal mixto	242,6	111,6	27 084,8	99 311,1
Aluvial inundable	186,4	3 121,5	588 252,7	2 156 922,7
Terraza baja	184,6	8 532,9	1 475 447,4	5 776 640,6
Terraza disectada	151,7	6 147,4	932 386,4	3 418 750,1
TOTALES		17 913,5	3 123 170,3	11 481 624,5

Fuente: Ministerio de Agricultura (2012).

En un estudio realizado por García *et al.*, (2012) sobre la determinación del stock de carbono en aguajales de la cuenca del río Aguaytía, en dos tipos de zonas (baja y alta) a dos profundidades 0-25 y 25-50 cm, determinaron que el carbono orgánico del suelo (COS) de ambas zonas presentó mayor promedio total. Sin embargo en el caso de los aguajales de zona alta presentó menos carbono total que todos los otros depósitos.

En los aguajales de la zona alta, el carbono orgánico del suelo ($3.78 \pm 1.28 \text{ t.ha}^{-1}$) fue significativamente menor en su contenido total de carbono en comparación a los otros depósitos en ambas zonas. Sin embargo, en la zona baja este mismo depósito mostró significativamente los mayores valores ($197.86 \pm 89.32 \text{ t.ha}^{-1}$) siendo el depósito con mayor carbono total. La biomasa aérea fue significativamente similar en su contenido

total de carbono en ambas zonas con $96.33 \pm 15.16 \text{ t.ha}^{-1}$ de C, en la zona baja y de $51.28 \pm 16.29 \text{ t.ha}^{-1}$ de C en la zona alta (Figura 1a y 1b). En los dos tipos de aguajales, la necromasa fue el depósito con menos carbono total.

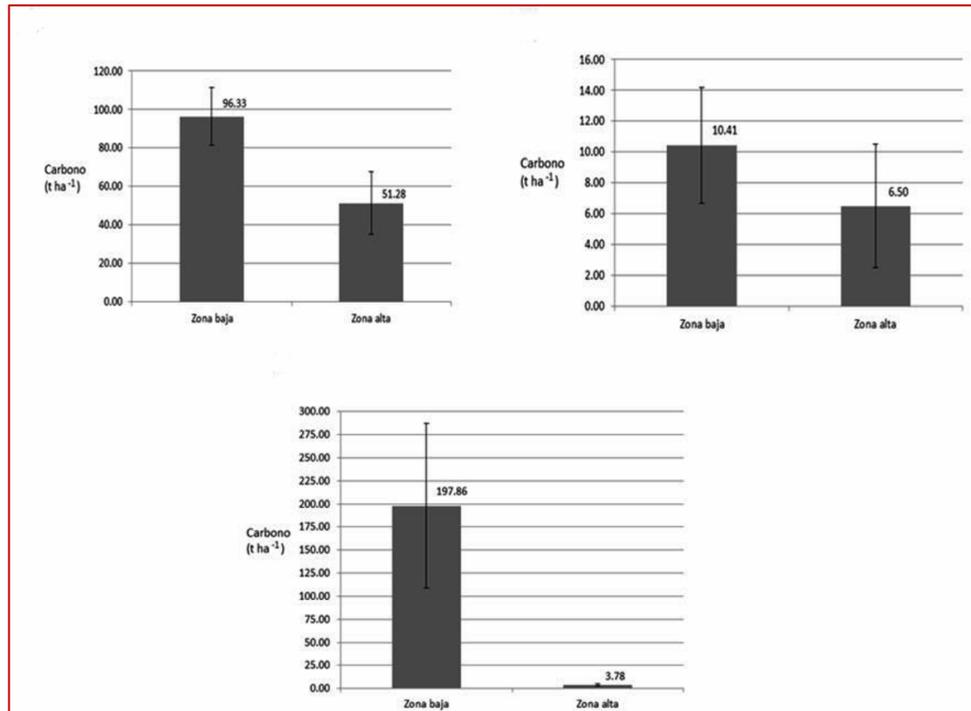


Figura 1. Almacenamiento de carbono total en diferentes depósitos en los Aguajales de la Cuenca del río **Aguaytía** (García *et al.*, 2012).

Cuellar *et al.*, (2015), en un trabajo de investigación realizado en la Cuenca de Aguaytía, región Ucayali para determinar el patrón de cambios que se producen en el carbono almacenado en el ecosistema debido al cambio de uso del suelo del bosque tropical, encontraron diferencias significativas entre sistemas de uso de la tierra, siendo $9,64 \text{ t.ha}^{-1}$ para bosque primario remanente; $9,5 \text{ t.ha}^{-1}$ para “palma aceitera”, $7,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para pastizal, de $6,6 \text{ t.ha}^{-1}$ para purma alta, $5,7 \text{ t.ha}^{-1}$ para purma baja y $3,5 \text{ t.ha}^{-1}$ para cultivos. Se evidenció menor cantidad de carbono en suelos con cultivos y la mayor cantidad se encontró en bosque primario remanente.

1.2. Bases Teóricas

1.2.1. El Sistema Suelo

El suelo es un recurso natural que corresponde a la capa superior de la corteza terrestre. Contiene agua y elementos nutritivos que los seres vivos utilizan. El suelo es vital, ya que el ser humano depende de él para la producción de alimentos, la crianza de animales, la plantación de árboles, la obtención de agua y de algunos recursos minerales, entre otras cosas. En él se apoyan y nutren las plantas en su crecimiento y condiciona, por lo tanto, todo el desarrollo del ecosistema (Scherr, 2006).

Los suelos son sistemas naturales abiertos y complejos, que se forman en la superficie de la corteza terrestre donde viven las plantas y gran diversidad de seres vivos y cuyas características y propiedades se desarrollan por la acción de los agentes climáticos y bióticos actuando sobre los materiales geológicos, acondicionados por el relieve y drenaje durante un período de tiempo (Scherr, 2006).

Los problemas más comunes en relación al suelo tienen que ver con las actividades de las personas. Al respecto, los problemas directamente derivados del uso antrópico de los suelos son actualmente muy severos. La erosión, la desertificación, la contaminación, la compactación, el avance de las ciudades, urbanización y la pérdida de fertilidad, se encuentran entre los problemas más graves que afectan hoy a los suelos (Scherr, 2006).

Los procesos que ocurren en el suelo constituyen la base de muchos procesos asociados con cultivos, malezas, plagas y enfermedades. Los procesos hídricos, químicos y bióticos del suelo interactúan entre sí y forman una unidad que puede ser denominada “*sistema suelo*”. Por otro lado, el subsistema suelo tiene interacción con la comunidad biótica de cultivos, enfermedades, plagas y malezas

y como cualquier sistema, un sistema de suelos es un conjunto de componentes que interactúan para dar al sistema características de estructura y función (Hart, 1985).

1.2.1.1. Manejo del sistema suelo

La estructura del sistema suelo influye directamente en su función y ésta puede tener influencia sobre la estructura y para diseñar la estrategia de manejo del sistema suelo es importante entender estas relaciones.

a. Manejo de entradas

Las actividades que el hombre realiza para modificar el sistema suelo están relacionadas con el manejo de entradas de agua y nutrientes. Una de las formas de mejorar el desempeño del sistema suelo es el uso del riego y parte de los estudios sobre la capacidad de almacenaje de los suelos, se han hecho para mejorar la eficiencia de los sistemas de riego que requieren del conocimiento de los procesos físicos, bióticos y económicos, ya que el exceso de agua puede reducir el oxígeno del suelo y perjudicar a los microorganismos. Al bajar y subir los niveles de agua se puede afectar el potencial de todo el sistema (Hart, 1985).

Por otro lado, el objetivo del uso de fertilizantes es el incremento de nutrientes disponible para las plantas. El fertilizante es colocado de tal manera que si existe humedad entren directamente en solución y luego ser absorbidos por el sistema radicular.

Otra práctica en el manejo del suelo es el uso de enmiendas químicas para contrarrestar condiciones desfavorables para las plantas y los cultivos. Las más comunes son el encalado y la aplicación de yeso para

contrarrestar la alcalinidad y salinidad del suelo. El propósito del encalado es disminuir la acidez del suelo, el yeso se usa para contrarrestar la alcalinidad y salinidad del suelo (Hart, 1 985).

b. Manejo de Salidas

Como el suelo es un sistema dinámico, es posible manejarlo modificando las salidas de agua, nutrientes y suelo. El agua sale del sistema suelo por evaporación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía. Estos procesos pueden disminuirse o aumentarse.

El manejo de plantas para modificar la escorrentía también modifica estas salidas. La salida de nutrientes puede ser modificada con la siembra de plantas que exigen poca o mucha cantidad. Generalmente la meta es disminuir estas salidas pero si existe un nivel tóxico de algún elemento, se puede manejar la vegetación para incrementar su salida. Ejemplo: en siembras prolongadas de plátano hay toxicidad por el cobre (Cu) el que se puede eliminar con siembras de gramíneas (Hart, 1 985).

1.2.2. Propiedades del suelo

1.2.2.1. Textura

El conocimiento de la composición volumétrica del suelo es importante para cualquier estudio, ya sea desde el punto de vista genético o aplicado. Determinadas propiedades de las partículas minerales del suelo están condicionadas por su tamaño. Existen diversos sistemas de clasificación utilizadas en la actualidad. Aunque todas aceptan de manera establecida los términos de grava, arena, limo y arcilla, difieren ligeramente en los límites establecidos para cada clase (Brady, 1990).

El tamaño de las partículas del suelo afecta tanto la superficie interna como el número y tamaño de los poros. Cuando menor es el tamaño de la partícula, mayor es la superficie interna del suelo; es decir, mayor es la suma de la superficie de las partículas del suelo. Por otra parte, y de manera general, un menor tamaño de partícula disminuye el tamaño de los poros del suelo, de manera que las partículas más pequeñas originan suelos con poros más escasos y pequeños. Los suelos están formados generalmente por más de una clase textural. Las tres fracciones suelen estar presentes en mayor o menor proporción. El porcentaje de cada una de esas fracciones es lo que se llama textura del suelo.

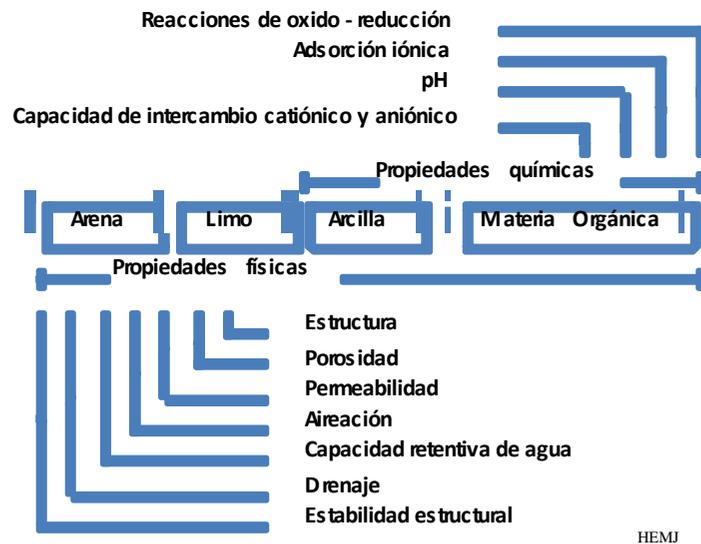


Figura 2: Relación de la textura y la materia orgánica con las propiedades Físicas y químicas del suelo. Propia con información de (Bullón, et al. 1990)

Según Jordán (2010) las partículas del suelo pueden dividirse de acuerdo a su tamaño de la siguiente manera:

- a. **Gravas y piedras.** Son partículas minerales sólidas, de diámetro comprendido entre 2 mm y 7 cm (gravas) o mayor (piedras). Cuando son muy abundantes, pueden afectar las propiedades del suelo y dificultar su manejo.
- b. **Tierra fina.** Esta fracción incluye las partículas menores de 2 mm de diámetro:
- **Arena.** Son partículas minerales sólidas de tamaño comprendido entre 0,05 a 2,0 mm de diámetro, forma el esqueleto del suelo, electrostáticamente es neutra y para las plantas es un elemento de división y de soporte, únicamente.
 - **Limo.** Está formado por partículas más finas que la arena y su tamaño está entre 0,002 a 0.05 mm de diámetro, algunos autores le asignan cierta cantidad de cargas eléctricas.
 - **Arcilla.** Es la fracción más fina del suelo con tamaño menor de 0,002 mm (2 micras). Está formado por cuarzo, óxidos de aluminio y agua. Tiene propiedades químicas y se comporta como un anión por tener cargas electrostáticas en su superficie (Ortiz y Ortiz 1990).

1.2.2.2. Estructura del suelo

La estructura se refiere a la forma en que las partículas del suelo se agrupan juntas en unidades más grandes. Estas unidades grandes se denominan agregados del suelo. Los agregados que se forman naturalmente en el suelo son los *ped agregados* propiamente dichos, mientras que las agrupaciones causadas por el cultivo se llaman *terrones*.

Los ped agregados propiamente dichos son relativamente grandes, oscilando su tamaño desde el de un grano de arena grande al de varios centímetros (Plaster, 2005).

Los espacios entre las partículas de arcilla pueden ser pequeños pero los espacios entre los ped agregados pueden ser grandes. Dentro los ped agregados hay pequeños microporos de retención de agua; entre ellos hay grandes macroporos llenos de aire. Los suelos bien agregados contienen poros grandes y continuos que promueven el movimiento normal del aire y proporcionan caminos rápidos para el crecimiento de la raíz. Mantienen una buena capacidad de retención del agua (Plaster, 2005).

Asimismo, Plaster (2005) señala que hay muchos tipos diferentes de estructura y algunos son más adecuados en la mejora de la permeabilidad que otros. Los edafólogos clasifican la estructura de acuerdo a tres grupos de características: Por el tipo o forma, por la clase o tamaño y por el grado de desarrollo:

- a. El tipo**, se refiere a la forma de los agregados del suelo. Estas formas son: Migajosa, granular, laminar, bloques angulares, bloques subangulares, prismática y columnas.
- b. La clase**, es el tamaño de los ped agregados que pueden ser muy finos, finos, medios, gruesos y muy gruesos.
- c. El grado**, se refiere a cómo son de fuertes y diferentes los ped agregados. Un grado, sin estructura, se aplica a suelos que no los tienen. Los grados débiles son escasamente visibles en un suelo húmedo, considerando que los agregados fuertes son bastante visibles y pueden ser fácilmente manipulados sin romperse.

1.2.2.3. Consistencia del suelo

La consistencia del suelo se refiere al comportamiento del suelo cuando se le aplica la presión. Se relaciona con el grado con que las partículas del suelo se pegan entre sí y principalmente con los resultados de cierto tipo de arcilla. La consistencia depende de la humedad del suelo, de tal forma que puede medirse a tres niveles de humedad (Plaster, 2005).

Según Jordán (2010) cada nivel tiene sus propios términos descriptivos:

- a. **Suelo mojado:** El suelo mojado se verifica a través de su pegajosidad y plasticidad. La plasticidad es la facilidad con que el suelo puede ser moldeado entre los dedos. Para determinar la pegajosidad se presiona algo de suelo entre los dedos índice y pulgar, y se nota la cantidad que queda adherida a los dedos.

- b. **Suelo húmedo:** Los términos friable y firme se aplican a los suelos en el estado húmedo. Friable significa que los materiales del suelo pueden desmenuzarse fácilmente bajo presión. Técnicamente, un suelo se denomina friable si un bloque de dos centímetros y medio de suelo húmedo puede desmenuzarse fácilmente entre el dedo pulgar e índice.

- c. **Suelo seco:** Determinado al intentar aplastar con la mano una masa de suelo secada al aire, en la mano. El suelo muy duro y seco puede ser desmenuzado entre las manos.

Mediante la tasación de la consistencia del suelo puede obtenerse información sobre la conveniencia de arar, la probabilidad de erosión o la textura. La prueba del tacto para la textura funciona con la consistencia de diferentes texturas del suelo. El suelo suelto es de textura gruesa, el suelo

friable es de textura media y bien agregado, y el suelo firme es apretado o de textura fina. Un suelo firme puede carecer de buena estructura o estar compactado de acuerdo a su consistencia (Jordán, 2010).

1.2.2.4. Color del suelo

Aunque es fácil tomar nota del color del suelo, no le afecta mucho, sin embargo es un indicador del mismo, de tal forma que los agricultores pueden aprender acerca del suelo a partir de su color. Los principales colorantes del suelo son el hierro (Fe) y la materia orgánica (Plaster, 2005).

El color del suelo puede ser una guía útil de la conveniencia del suelo para varios usos. Como un guía es más fiable dentro de una región: Las comparaciones entre regiones con diferentes climas y mineralogía pueden no ser válidas.

Ortiz y Ortiz (1990) agregan que el color del suelo se miden más convenientemente por la comparación con la Carta de Colores de Munsell, esta carta consiste de más de 175 colores sistemáticamente arreglados de acuerdo con las anotaciones Munsell y basados en el matiz o tinte (hue), brillo o pureza (value) y la intensidad o saturación (chroma).

El color del suelo está relacionado con los minerales que lo originaron y a las condiciones de drenaje. La coloración oscura se relaciona con la materia orgánica (Plaster, 2005).

a) **Importancia del color del suelo**

Los suelos oscuros o ricos en materia orgánica tienen:

1. Una buena estructura que facilita la labranza.
2. Buena estabilidad de los agregados, lo cual evita la erosión y el apelmazamiento del suelo después de una lluvia o riego.
3. Una adecuada cantidad de N y liberación de P, K Ca, Mg y S. con un buen nivel de materia orgánica que es fuente importante de los elementos menores (Plaster, 2005).

Plaster (2007) sostiene que de manera práctica se pueden encontrar los siguientes colores:

- a. Marrón oscuro a negro:** Los colores oscuros resultan de la materia orgánica o de materiales originales oscuros. Se debe considerar la profundidad del color para seleccionar la rotación de cultivos o la fertilización más adecuada.
- b. Blanco a gris claro:** Indica que las sustancias químicas del color del suelo han sido lixiviadas. Puede verse en suelos arenosos fuertemente lixiviados y en los horizontes E. El color claro también puede deberse a acumulaciones de cal, yeso u otras sales.
- c. Marrón claro, amarillo a rojo:** Estos son los colores de minerales férricos oxidados, semejantes al óxido. El color rojo indica buen drenaje porque hay suficiente oxígeno.
- d. Gris azulado:** Indica hierro en proceso de reducción-oxidación. La carencia de oxígeno es el resultado de un suelo con exceso de humedad con drenaje pobre.

- e. **Veteados:** El suelo presenta parches de diferentes colores, a menudo manchas de óxido, amarillos y grises indicando que el suelo está encharcado en algún tiempo del año pero no continuamente.

1.2.2.5. pH

Según Ortiz y Ortiz (1990), el pH es el grado de acidez o basicidad de una suspensión suelo-agua u otra solución. Se expresa también como pH como a la concentración de protones (H^+) en un litro de agua o como el logaritmo negativo de la concentración de iones H^+ en la solución del suelo:

$$pH = -\log (H^+) = \log \frac{1}{(H^+)}$$

La concentración de iones (H^+) en la solución para los pH frecuentes en los suelos, permite determinar el pH de los suelos (ecuación anterior).

Tabla 2

Concentración de hidrogeniones y su relación con el pH del suelo

pH	Concentración de (H^+) en g en un litro de solución	pH	Concentración de (H^+) en g en un litro de solución
4	0,0001	7	0,0000001
5	0,00001	8	0,00000001
6	0,000001	9	0,000000001

Fuente: Ortiz y Ortiz (1990)

Así un suelo que tiene pH igual a 5 tiene una concentración de iones (H^+) diez veces mayor que otro con pH 6. Asimismo, el pH refleja solamente la acidez actual y no la acidez total, por lo que suelos con el mismo pH pero

con diferente acidez requerirán diferentes cantidades de cal para cambiar el pH.

1.2.2.6. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica es la porción del suelo que incluye restos de animales y plantas en varios estados de descomposición. En los bosques proviene de las hojas caídas, troncos de árboles muertos y de raíces de árboles. En las praderas, gran cantidad de la materia orgánica viene de las raíces y restos de las hierbas. En las tierras de cultivo, los residuos de las cosechas se añaden a la materia orgánica (Plaster, 2005).

a. Composición química de la materia orgánica

La materia orgánica está compuesta de complejas sustancias que contienen carbono. Los átomos de carbono, al contrario de otros elementos, forman cadenas largas de forma natural. Estas proporcionan un armazón al que se adhieren otros elementos como el hidrógeno, oxígeno y azufre, para constituir la amplia serie de compuestos orgánicos necesarios para la vida.

Los carbohidratos son cadenas largas de azúcares simples; cada eslabón de la cadena, es una molécula de azúcar. Los azúcares son cadenas cortas de carbono, de cinco o seis carbonos, con muchos átomos de oxígeno adheridos. El almidón familiar por ser un importante alimento que el ser humano toma de las plantas, es una forma común de carbohidrato. Gran parte del tejido de las hierbas, de los troncos de los árboles y de otras plantas es de celulosa, otro carbohidrato. La celulosa forma fibras largas en el tejido de la planta. Los carbohidratos son un importante alimento para la microflora del suelo, que rápidamente los

descompone en CO₂ y agua. La mayoría del tejido de la planta es almidón y celulosa (Brady, 1990).

Las ligninas ocupan entre el 10 al 30 por ciento del tejido de la planta, hacen que las plantas se mantengan más erguidas, cementando las fibras de celulosa y son moléculas complejas que resisten a la descomposición. El maíz tiene un alto contenido de lignina, que es la razón por la que los tallos del mismo permanecen visibles en los suelos más que otros residuos de cosecha. La lignina origina la mayor parte del humus del suelo (Brady, 1990).

La proteína es una cadena larga de compuestos más simples que contienen nitrógeno llamados aminoácidos. Estos son también cadenas cortas de carbono con átomos de nitrógeno y a veces átomos de azufre adheridos. Los residuos de la proteína descompuesta se convierten en parte del humus, suministrándole la mayoría de su nitrógeno (Brady, 1990).

b. Descomposición de la materia orgánica

La descomposición de la materia orgánica ocurre en dos etapas básicas. En la primera, la flora del suelo digiere rápidamente los materiales orgánicos, liberando dióxidos de carbono y carbohidratos. Los materiales fácilmente descompuestos, como los carbohidratos, se consumen primero. Las largas cadenas de carbono se dividen en otras más cortas, los átomos adheridos se separan y se producen compuestos más simples. Alguno de estos compuestos simples reacciona después para convertirse en una serie de compuestos complejos, resistentes a la descomposición, llamado *humus*. Permanecen los materiales más

resistentes, como la lignina, pero son levemente cambiados para formar humus. Durante la segunda etapa el humus se descompone muy lentamente (Plaster, 2005).

El humus es un conjunto de compuestos complejos que serían difíciles de describir totalmente. Contiene muchos elementos diferentes, incluso muchos nutrientes de la planta. Cerca del 50 por ciento del humus, es carbono, el 5 por ciento es nitrógeno y un 0,5 es fósforo. El humus es de color oscuro y está formado por partículas diminutas del tamaño de la arcilla (Jordán 2010).

c. Funciones de la materia orgánica

Según Plaster (2007) la materia orgánica mejora las condiciones de todos los suelos minerales debido a muchas razones. La materia orgánica ayuda a los suelos arenosos incrementando su capacidad de retención de agua y nutrientes. Mejora a los suelos arcillosos soltándolos y mejorando su laboreo. Las funciones más importantes de la materia orgánica son:

d. Almacenaje de nutrientes y agua

La materia orgánica almacena nutrientes que usados por las plantas de dos formas diferentes:

El primer método de almacenaje resulta del tamaño de las partículas de humus. Como la partícula de arcilla, las del humus son extremadamente pequeñas con una superficie relativamente grande. Las partículas de este tamaño se llaman *coloides*. El agua y los nutrientes se adhieren a la

superficie grande de los coloides. Además, los coloides de arcilla y humus, atraen algunos nutrientes de igual manera que un imán atrae limaduras de hierro (Plaster, 2005).

La materia orgánica también almacena nutrientes como parte de su propia composición química, liberada para el uso de la planta a través de la descomposición. El humus contiene el mayor suministro de boro y molibdeno del suelo y cerca del 60 por ciento del fósforo y un 80 por ciento del azufre del suelo. La mayoría del nitrógeno del suelo está almacenado en la materia orgánica. La materia orgánica actúa como una reserva principal de nutrientes del suelo (Brady, 1990).

Tanto la materia orgánica fresca como el humus absorben agua como una esponja, reteniendo aproximadamente seis veces su propio peso en agua. Esto es muy importante en suelos de naturaleza seca y arenosa. De hecho, la capacidad de retención de nutrientes y agua de la materia orgánica es su mayor beneficio en suelos arenosos (Ortiz y Ortiz, 1990).

e. Disponibilidad de nutrientes

El humus no solo almacena nutrientes, sino que también hace que varios nutrientes estén más disponibles para el uso de la planta. Al descomponerse la materia orgánica, libera ácidos orgánicos suaves que devuelven minerales al suelo, capturándolos para el uso de la planta. El fósforo del suelo tiende a formar compuestos que no se disuelven en el agua. Estas formas no pueden moverse en el suelo, ni pueden absorberlos las raíces de las plantas. Los ácidos orgánicos actúan en esos compuestos haciendo que el fósforo esté más disponible para el uso de la planta (Porta, *et al.*, 2003).

Algunos nutrientes como el hierro y el zinc reaccionan con otras sustancias químicas del suelo para formar compuestos insolubles. Ciertas moléculas del humus forman un anillo alrededor del átomo de metal en el proceso que se llama *quelatización*. Estos quelatos protegen los átomos metálicos de ser encerrados en el suelo, ayudando a mantener el hierro, cobre, zinc y otros, más disponibles para las plantas. Por otro lado, el cobre está firmemente encerrado en el humus que es el menos disponible en suelos con alto contenido en materia orgánica (Plaster, 2005).

f. Agregación del suelo

Como ya se ha mencionado, la materia orgánica provoca que las partículas del suelo se agrupen para formar agregados del suelo y sustancias pegajosas producidas por la unión de organismos del suelo con agrupaciones del suelo. Una mejor agregación mejora el laboreo y permeabilidad del suelo. El suelo es más fácil de trabajar, está mejor aireado y absorbe agua más rápidamente. Ésta puede ser la manera más importante en que los suelos de arcilla pesados respondan a la materia orgánica (Sys y Verheye, 1993).

g. Prevención de la erosión

Los suelos que se mantienen provistos de materia orgánica tienen una estructura optimizada que mejora considerablemente la infiltración del agua. Debido a que el agua se infiltra rápidamente en suelos con alto contenido de materia orgánica, durante las tormentas se escapa menos agua y no se produce la erosión. Datos utilizados en la Ecuación

Universal de Pérdida del Suelo, una herramienta de predicción de las tasa de la erosión, indican que el incremento de la materia orgánica del suelo del 1 al 3 por ciento, puede reducir la erosión entre un tercio a un quinto. Una pérdida equivalente de materia orgánica incrementa la erosión (Jordán, 2010).

h. Efectos no deseados

Durante la descomposición de la materia orgánica fresca, pueden ocurrir dos efectos no deseados, aunque son provisionales. El primero es que el nitrógeno es atrapado en los cuerpos de los microorganismos durante el proceso de descomposición. Es inmovilizado y no está disponible para las plantas. El segundo efecto es que ciertos residuos son tóxicos para otras plantas. Los residuos de algunas plantas liberan sustancias químicas durante la descomposición y dañan el crecimiento de otras plantas. Por ejemplo, raíces de zarcillos, pueden ralentizar el crecimiento de las plantas de cultivo en tanto no se descompongan completamente (Jordán, 2010).

1.2.2.7. El coloide del suelo

La función de los coloides es mayormente para las plantas. Los coloides son agrupaciones de arcillas cargadas negativamente que retienen cationes importantes para las plantas, además de que retienen agua. Los cationes (minerales) y el agua, son vitales para las plantas y por las raíces las plantas toman estos nutrientes de los coloides (Ortiz y Ortiz, 1990).

(1) Propiedades coloidales de los minerales arcillosos y la materia orgánica

El suelo es un material muy complejo, en el cual se manifiesta la acción de diversos coloides: arcilla, humus e hidróxidos metálicos. Las partículas arcillosas del suelo originan reacciones propias del estado coloidal, tales como la desviación de la luz, la presión osmótica y la carga eléctrica.. La carga negativa predomina en la mayoría de suelos.

Como consecuencia, la adsorción catiónica en el suelo es un fenómeno típico. En la adsorción de aniones, la situación es diferente, y la cantidad de aniones adsorbidos es normalmente de menor importancia.

En general, la adsorción de aniones es más pequeña y más específica que la adsorción de cationes que es muy grande y casi no específica (Ortiz y Ortiz, 1990).

(2) Mecanismos de retención iónica

a. Las cargas electrostáticas, su origen

Los sólidos en suspensión acuosa, coloides naturales o artificiales están eléctricamente cargados. La carga es el instrumento que determina su comportamiento, por ejemplo en relación al estado de dispersión se produce la adsorción o intercambio de iones. El origen de la carga eléctrica de los coloides del suelo, se atribuye a cinco causas: (a) La sustitución isomórfica, (b) La presencia en la superficie de las arcillas del grupo AlOH, (c) La presencia de los grupos SiOH, (d) Los coloides orgánicos y (e) La presencia de hidróxidos metálicos (Bullón *et al.* 1990).

La carga eléctrica de los minerales arcillosos, debido a las sustituciones isomórficas es siempre negativa. Las cargas originadas por los grupos AlOH y SiOH son capaces de variar en signo y magnitud con el pH y la concentración de electrolitos del sistema, ellas están situadas sobre las fases laterales de los cristales. Otros consideran que la existencia del grupo SiOH₂ es poco probable a pH superiores a 3,5; consecuentemente en los suelos ácidos la carga positiva es originada sobre todo por grupos AlOH (Bullón *et al.*, 1990).

La carga eléctrica también se origina en los coloides orgánicos presentes en el suelo, tales como: -COOH, -OH, -NH₂. Ciertos autores sostienen que esos grupos se cargan negativamente en un medio básico por la formación de los iones: -COO⁻, NH₂⁻. La presencia de iones -NH₂⁻ bajo condiciones normales es improbable. Finalmente las cargas (sobre todo positivas) pueden presentarse en la superficie de los hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio (Bullón *et al.* 1990).

b. La carga permanente

Las superficies planas de las arcillas portan frecuentemente una carga negativa permanente, debido a la sustitución isomórfica de cationes en las capas tetraédricas u octaédricas de las arcillas.

c. La carga dependiente del pH

Se origina por deprotonación de los grupos -OH, -NH₂⁺, -COOH y OH localizados en los bordes de las arcillas y de la materia orgánica (depende del pH) (Bullón *et al.* 1990).

1.2.3. Degradación de suelos

La erosión del suelo se está acelerando en todos los continentes y está degradando unos 2000 millones de hectáreas de tierra de cultivo y de pastoreo, lo que representa una seria amenaza para el abastecimiento global de víveres. Cada año la erosión de los suelos y otras formas de degradación de las tierras provocan una pérdida de entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierras cultivables. En los países subdesarrollados, la creciente necesidad de alimentos y de leña ha tenido como resultado la deforestación y el cultivo en laderas con mucha pendiente, lo que ha producido una severa erosión de las mismas (Scherr, 2006).

Para complicar aún más el problema, hay que tener en cuenta la pérdida de tierras de cultivo de primera calidad debido a la industria, los pantanos, la expansión de las ciudades y las carreteras. La erosión del suelo y la pérdida de las tierras de cultivo y los bosques reduce además la capacidad de conservación de la humedad de los suelos y añade sedimentos a las corrientes de agua, los lagos y los embalses (Scherr, 2006).

Por otro lado Lal (1995), agrega que las causas o agentes de la degradación del suelo son fuerzas socioeconómicas o culturales manejadas por variables demográficas (Ejemplo: densidad de población y trasmigración); razones estratégicas para la deforestación para crear acceso a los recursos potenciales, incluyendo seguridad nacional y factores institucionales tales como soportes logísticos y técnicos, costumbres de tenencia de tierra y muchas otras características culturales y étnicas que determinan la demanda de los recursos naturales.

Tres procesos importantes de la degradación del suelo en el trópico húmedo son brevemente descritos:

- a. Degradación física.** La degradación física del suelo está relacionada con el declinamiento de la estructura originando encostramiento, compactación, excesiva escorrentía superficial y erosión acelerada. Altas temperaturas del suelo que exceda a 40°C en los 5 cm de profundidad por 4 a 6 horas en un día, es otro factor que acentúa la degradación del suelo al afectar la estructura del suelo y a la proporción de muchos procesos dentro del suelo. La degradación física es también agravada por los cambios drásticos en el balance de la energía y el ciclo hidrológico por la deforestación y las actividades agrícolas intensivas (Lal, 1995).
- b. Degradación química.** La ruptura de los ciclos del carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y otros minerales conduce a la degradación química del suelo. La forma más importante de la degradación química es la acidificación debido al agotamiento o disminución de las bases en el suelo (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+}) y a la acumulación de H^{+} y Al^{+3} en el complejo de intercambio. La disminución en el suelo de los nutrientes para las plantas (N, P, K, Zn, S) es otra causa de la degradación química (Lal, 1995).
- c. Degradación Biológica.** La reducción en la calidad y cantidad de la materia orgánica del suelo, la actividad biótica y la diversidad de especies de la fauna del suelo, son formas importantes de la degradación biológica observada en el trópico húmedo. La fauna del suelo juega un papel importante en el reciclaje de los nutrientes y en el mantenimiento de la estructura. La degradación biológica también se refiere al cambio en la vegetación clímax, vastas áreas del trópico húmedo previamente cubiertas con bosques están ahora infestadas con grasas duros y leñosos (Lal, 1995).

1.2.4. Carbono en el suelo

Si bien las tasas de captura de carbono pueden variar considerablemente, los bosques naturales pueden ser considerados en equilibrio dinámico en relación al carbono bajo ciertas condiciones climáticas y para ciertas concentraciones atmosféricas de CO₂. En el bosque prístino, por ejemplo en la Amazonía, es el ecosistema que contiene la mayor cantidad de carbono (305 t-ha⁻¹, de las cuales el 28 por ciento está en el suelo. Todos los cambios en el manejo de tales ecosistemas inducen cambios importantes en la dinámica del carbono, dando lugar a menores existencias de carbono que en el bosque original. Estas formas de manejo incluyen la agricultura de rozo, tumba y quema, la deforestación y la agrosilvicultura (Woomer *et al.*, (1998).

Para determinar el C secuestrado en los ecosistemas, hay que tener en cuenta el C estable incorporado al suelo. Si la acumulación de C en el suelo es un proceso más lento que la acumulación de la biomasa, la estabilidad del C en el suelo es mayor. Por lo tanto, la capacidad del suelo para almacenar C es importante debido al material vegetal acumulado en descomposición, pasando a denominarse C del humus. La poda de los árboles y las hojas caducas puede contar como pérdida de carbono del cultivo si se retira de la plantación o se quema, mientras que si la poda se descompone naturalmente en el suelo, se convierte en un medio eficaz de inmovilización de CO₂ a largo plazo (Lal, 1997).

De hecho, un año después de agregar los residuos vegetales a la tierra, la mayor parte del carbono vuelve a la atmósfera en forma de CO₂. Sin embargo, de una quinta a una tercera parte del mismo permanece en el suelo, ya sea como biomasa viva o como humus del suelo (Brady y Weil, 2004).

De acuerdo a la Evaluación Global de los Recursos Forestales de la FAO, la tasa global actual de deforestación es de cerca de 17 millones de hectáreas por año, alrededor de 0,45 por ciento de lo que resta del ecosistema forestal. La pérdida de

carbono resultante, es inmediata e importante. Aún si la parte superior de la biomasa fuera eliminada y quemada, entre 50 y 60 por ciento del carbono total del sistema está sobre la superficie del suelo o en el suelo-residuos, materia orgánica del suelo - raíces y puede ser manejada adecuadamente (FAO, 1993).

1.2.4.1. Ciclo de Carbono.

Desde la perspectiva biológica, los eventos claves del ciclo del carbono son la fotosíntesis y respiración como reacciones complementarias. La respiración toma los carbohidratos y el oxígeno y los combina para producir CO₂, agua y energía. La fotosíntesis toma el CO₂, agua y produce carbohidratos y oxígeno. Estas reacciones son complementarias tanto en sus productos como en lo referente a la cantidad de energía utilizada. La fotosíntesis toma la energía del sol y la acumula en las cadenas carbonadas de los carbohidratos; la respiración libera esta energía rompiendo dichas cadenas (Mengel y Kirkby, 1987).

Plantas y animales respiran, pero sólo las plantas (y otros productores como las cianobacterias) pueden realizar fotosíntesis. El reservorio principal de CO₂ está en los océanos y en las rocas. El CO₂ se disuelve rápidamente en el agua. Una vez en el agua, precipita como roca sólida conocida como carbonato de calcio (calcita). El CO₂ convertido en carbohidratos en las plantas tiene tres rutas posibles: (a) puede liberarse a la atmósfera con la respiración, (b) puede ser consumido por animales o (c) es parte de la planta hasta que ésta muere (Mengel y Kirkby, 1987).

Los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂.

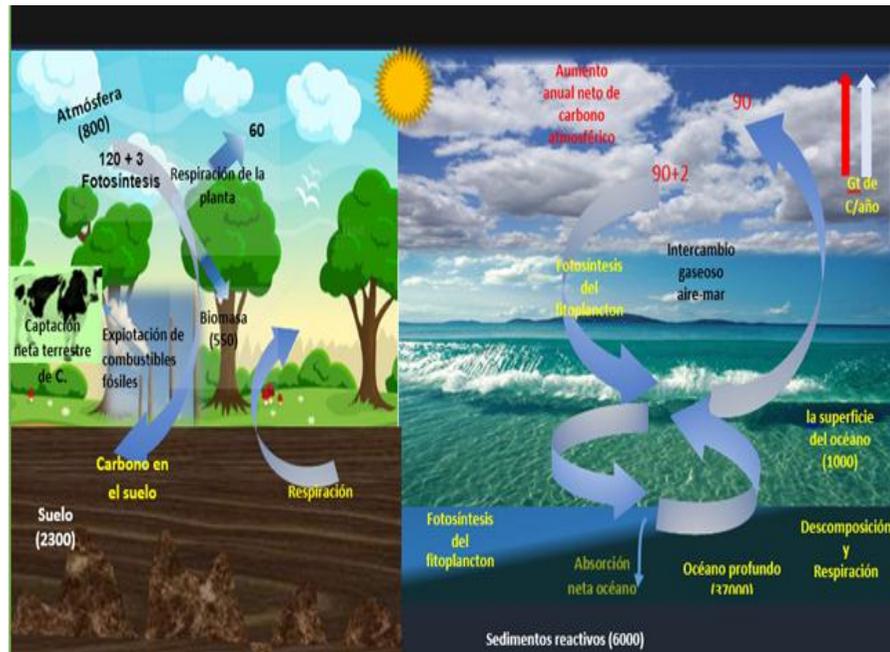


Figura 3: El Ciclo del Carbono. Propia con información de (Houghton, 1995).

El desarrollo de la agricultura es la principal causa del incremento de CO₂. Houghton (1995) estima que las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra -deforestación e incremento del pastoreo fueron cerca de 140 Gt entre 1850 y 1990 (de 0,4 Gt /año en 1850 a 1,7 Gt /año en (1990), con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Gt de carbono. Hoy en día, los mayores contribuyentes son la combustión de combustibles fósiles y factores relacionados con el uso de fertilizantes químicos. De acuerdo con IPCC (2000), la pérdida histórica de los suelos agrícolas fue de 50 Gt de carbono en el último medio siglo, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación.

Un hecho importante, es que mientras la deforestación de muchas áreas tropicales produce emisiones de carbono estimadas en 1,5 Gt /año, al mismo tiempo se produce una acumulación en los ecosistemas terrestres de 1,8 a 2 Gt /año.

Esto representa lo que es conocido como el carbono faltante en el ciclo: un sumidero que podría estar situado principalmente en la parte norte del hemisferio norte (Schindler, 1999). Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica conciernen la vegetación, ingreso de residuos, composición de las plantas, los factores climáticos, condiciones de temperatura y humedad y las propiedades del suelo textura, contenido y mineralogía de la arcilla, acidez.

En un tipo de suelo expuesto a prácticas agrícolas constantes, se alcanza un casi un equilibrio de situación estable de la materia orgánica del suelo después de 30 a 50 años. En el contexto del combate del calentamiento global y del Protocolo de Kyoto, un punto importante es cómo crear en los suelos agrícolas de todo el mundo un sumidero de carbono bien cuantificado. Tal captura de carbono será relevante para los artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo y también tendrá efectos positivos adicionales para la agricultura, el ambiente y la biodiversidad (Greenland, 1995).

1.2.4.2. Pérdida de carbono

Aparte de los factores climáticos, principalmente la temperatura, los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. La lixiviación del carbono orgánico e inorgánico es otro mecanismo importante de pérdida de carbono en el suelo. La erosión del suelo, tanto hídrica como eólica, representan la forma más importante del proceso de degradación del suelo y afecta a más de 1 000 millones de hectáreas en todo el planeta (Gregorich *et al.*, 1998).

La pérdida de suelo varía, por lo general, entre 1 y 10 t.ha⁻¹año⁻¹, llegando en algunos casos hasta 50 t.ha⁻¹. Esto acarrea una pérdida importante de

materia orgánica del suelo. La evaluación exacta de estas cantidades de carbono es difícil a causa de la heterogeneidad en el tiempo y en el espacio. La pérdida global por erosión podría estar entre 150 y 1 500 millones t.año⁻¹, lo que es algo menor del estimado a nivel continental (Gregorich *et al.*, 1998).

a. Almacenamiento o captura del carbono

Schroeder (1994) llevó a cabo una evaluación del almacenamiento del carbono en diferentes ecorregiones del Mundo y concluye que en las áreas forestales tropicales, se puede obtener un almacenamiento de 21 a 50 t.ha⁻¹ de carbono (C) en zonas subhúmedas a húmedas, respectivamente, y con ciclos de corte de ocho o cinco años, mucho más cortos que en los bosques. En estos cálculos no se incluyó el carbono del suelo: sin embargo, las raíces por si solas podrían incrementar esos valores en un 10 por ciento. En los principales sistemas agroforestales se podría mantener el carbono original presente en el ecosistema del bosque. Por ejemplo, en un período de 10 años, bajo cacao y bajo “cacao”/*Erythrina* sp., se obtuvieron aumentos de 10 y 22 t.ha⁻¹ de C, respectivamente (Fassbender *et al.*, 1991).

La agrosilvicultura, o sea la asociación de árboles con cultivos o pasturas puede representar una alternativa sostenible a la deforestación y a la agricultura de rozo, tumba y quema. Esta práctica tiene un gran potencial para la captura de carbono en tierras de cultivos (Sánchez, *et al.*, 1999).

El suelo tiene un gran potencial como sumidero de carbono por el cual existen tres tipos de almacenes para el carbono orgánico de ciclo rápido o biológico, de acuerdo con su ubicación respecto a la superficie del

suelo: (a) el almacén aéreo es la vegetación, (b) el almacén superficial es el mantillo (hojarasca y capa de fermentación) y (c) el almacén subterráneo lo constituyen el suelo y las raíces de las plantas (Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe, 2014).

b. Sumidero de Carbono

La vegetación actúa como sumidero de C por su función vital, la fotosíntesis. Mediante esta función, las plantas absorben CO₂ que compensa tanto las pérdidas de este gas que se producen por la respiración como por las emisiones producidas en otros procesos naturales [descomposición de materia orgánica] (UNESA, 2005).

Los ecosistemas vegetales forman un componente importante en el balance global de carbono (C). A escala mundial se considera que la biosfera terrestre fija cerca de 2 000 000 toneladas por año (UNESA, 2005). Este valor es el resultante de la pequeña diferencia entre la absorción fotosintética del CO₂ y las pérdidas por respiración, por descomposición de la materia orgánica y por perturbaciones de diferente naturaleza. A este valor le se denomina producción neta de la biosfera (PNB) y es la cantidad que a largo plazo queda almacenada en el sumidero. Esta diferencia es convertida en biomasa y suele oscilar entre el 45-50 por ciento del peso seco de la planta. Por lo tanto, mientras el crecimiento sea alto, la vegetación natural y los cultivos agrícolas se convierten en los sumideros de carbono. Teniendo esto en cuenta, la agricultura se puede convertir en un mecanismo efectivo para mitigar el incremento del CO₂ atmosférico (UNESA, 2005).

Debido al aumento en la temperatura y la fijación de CO₂ se incrementará en 1 por ciento por cada °C en regiones donde la

temperatura media anual es de 30 °C y el 10 por ciento en regiones donde la temperatura media anual es de 10 °C. Se estima que la fijación del CO₂ se verá incrementada en los próximos 60 años. Las tasas fotosintéticas subirían un 25-75 por ciento, en las plantas de fotosíntesis C3 (las más comunes en latitudes medias y altas), al duplicarse la concentración de CO₂. Los datos son menos concluyentes en el caso de las plantas cuya modalidad fotosintética es la C4, típica de lugares cálidos, siendo los intervalos de respuesta desde 0 por ciento hasta un 10-25 por ciento de incremento (UNESA, 2005).

c. Fijación de carbono en plantas C3, C4 y CAM.

Como adaptación ambiental las plantas tendrán un metabolismo distinto de fijación del CO₂, por lo tanto se clasifican en plantas C-3, C-4 ó CAM. En ellas, tanto la eficiencia del uso del agua y como la tasa de fijación de CO₂ es diferente. Las plantas C-3 se caracterizan por mantener las estomas abiertos durante el día para permitir la fijación del CO₂, lo que provoca una pérdida de agua por transpiración, de forma continua. Ante el riesgo de deshidratación ocasionado por un estrés ambiental, estas plantas producen un cierre estomático que provoca una gran disminución de la fotosíntesis. Las plantas C-4 se caracterizan por tener las estomas abiertas de día. Como poseen intermediarios de bombeo del CO₂ en la célula, pueden permitirse un cierre de estomas imprevisto, siendo factible la continuidad del proceso fotosintético, gracias al reservorio de CO₂. Las plantas CAM tienen estomas abiertos por la noche. Las pérdidas de agua por transpiración se reducen enormemente. También poseen reservorio de CO₂, con lo cual también pueden cerrar estomas sin que ello conlleve una disminución fotosintética. Las propiedades de las plantas C-4 y CAM les permiten

una supervivencia en entornos con déficit hídrico (Mengel and Kirkby, 1987).

d. Interacción entre usos de la tierra y el almacenamiento de carbono en el suelo

El principal medio de ingreso de carbono a los ecosistemas es vía fotosíntesis, siendo más obvio el almacenamiento cuando se da en la biomasa superficial; sin embargo los suelos son los que poseen la mayor cantidad de carbono. Llegando a la parte subterránea por medio del crecimiento, el movimiento y los exudados de las raíces de las plantas, además de la descomposición de hojarasca (Montagnini y Fair, 2004, citado por Carvajal, 2008).

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo representan un equilibrio dinámico de pérdidas y ganancias que se afectan por procesos erosivos, oxidación, humificación y esorrentía, razón por la cual, el secuestro de carbono se da principalmente en aquellos sistemas que aportan altas cantidades de biomasa, mejoran la estructura del suelo, aumentan la actividad y la diversidad de fauna edáfica y propician mecanismos de reciclaje (Lal, 2004).

El suelo es considerado los mayores almacenadores de carbono terrestre, del cual el 13 por ciento está contenido en los suelos tropicales (Dixon, 1995 y Young, 1997, citados por Montagnini y Fair, 2004). Sin embargo, el almacenamiento de este elemento en el suelo esta propenso a variaciones debido a cambios en el uso de la tierra y las prácticas de manejo. Las pérdidas de carbono edáfico se dan por el cambio de uso de ecosistemas naturales a sistemas agrícolas, debido a la reducción en los aportes de materia orgánica para la protección física del suelo y a la

disminución de materiales no solubles en los residuos de cosecha, es de manera que estas conversiones pueden reducir el carbono del suelo en más del 50 por ciento a una profundidad de 20 cm y entre 25-30 por ciento a 100 cm, durante un periodo de agricultura de 30 a 50 años (Tan y Lal, 2005).

1.2.5. El Nitrógeno en el Suelo

El nitrógeno del suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica, la mayor cantidad de nitrógeno es parte integrante de materiales orgánicos complejos del suelo.

1.2.5. Ciclo del nitrógeno

Havlin *et al.*, (2005) señala que en el punto 1 del ciclo del nitrógeno, el N de los residuos de plantas y animales y derivados de la atmósfera a través a procesos eléctricos, de combustión y la actividad industrial (El N_2 es combinado con el H_2 o O_2) es adicionado al suelo. En el punto 2, el N orgánico de los residuos es mineralizado a NH_4^+ por los organismos del suelo. Las raíces de las plantas absorben una porción de NH_4^+ .

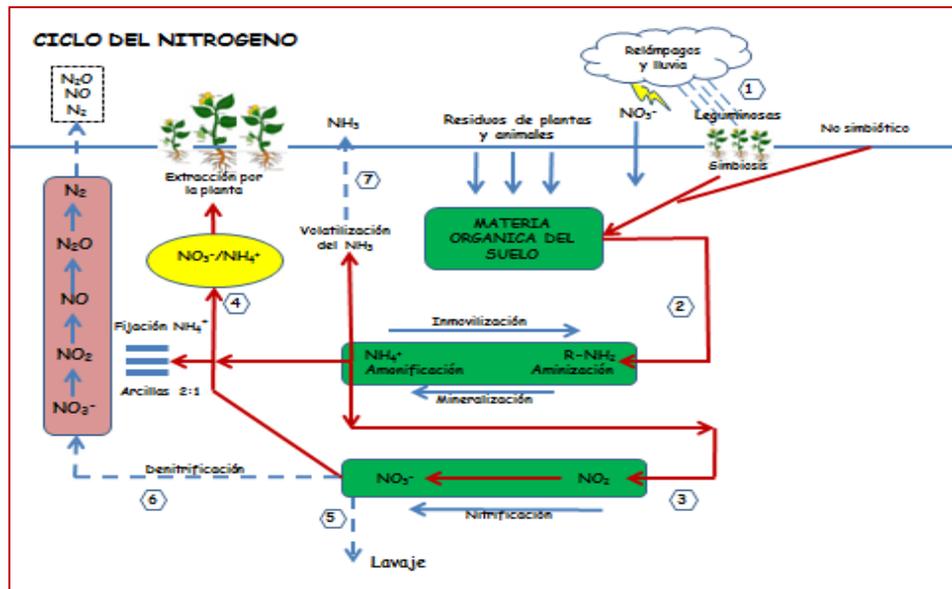


Figura 4: Ciclo del Nitrógeno. Propia con información de (Havlin et al., 2005)

En el punto 3, mucho del NH_4^+ es convertido a NO_3^- por las bacterias nitrificantes en un proceso llamado nitrificación. En el punto 4, el NO_3^- y el NH_4^+ son absorbidos por las raíces de las plantas y usados para producir proteínas en los cultivos que serán alimentos para los humanos o para el ganado. En el punto 5, algo de NO_3^- se pierde hacia la napa freática o al sistema de drenaje como resultado del movimiento descendente a través del suelo de agua de percolación. En el paso 6, algo de NO_3^- es convertido por la bacteria denitrificante en N_2 y óxido de N (N_2O y NO) que escapa hacia la atmósfera completando el ciclo. En el paso 7, algo del NH_4^+ puede ser convertido en NH_3 mediante el proceso llamado volatilización (Havlin et al., 2005).

Asimismo, (Jones y Jacobsen 2005) agregan que el ciclo está conformado por los siguientes procesos: (a) asimilación por algunas plantas, (b) intercambio o atracción del amonio (NH_4^+) hacia la superficie del suelo, (c) nitrificación o conversión del amonio en nitritos (NO_2^-) y nitratos

(NO₃⁻) en presencia de oxígeno, (d) desnitrificación, paso de nitratos a nitrógeno gaseoso (N) en condiciones anaeróbicas, (e) volatilización, que es la pérdida de amoníaco (NH₃) en forma gaseosa en condiciones de pH alto, (f) mineralización, donde se libera amonio a partir de la descomposición microbial de la materia orgánica, (g) inmovilización, conversión de nitrógeno inorgánico (NO₃⁻ o NH₄⁺) en orgánico, (h) Fijación de nitrógeno gaseoso por algunos organismos, y (i) filtración, movimiento del nitrógeno en el suelo por la acción del agua.

1.2.5.2. Compuestos nitrogenados inorgánicos

Las formas inorgánicas del nitrógeno del suelo incluyen: NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂, N₂O, NO y nitrógeno elemental (N₂). Desde el punto de vista de la fertilidad del suelo los más importantes son: NH₄⁺, NO₃⁻ y NO₂⁻, en cambio el óxido nitroso y el óxido nítrico son las formas del nitrógeno que se pierden en el proceso de desnitrificación (Sagan, 2001).

1.2.5.3. Compuestos nitrogenados orgánicos

Las formas orgánicas del nitrógeno del suelo se encuentran en forma de aminoácidos, proteínas, azúcares y otras formas complejas que se producen por la reacción del amonio con la lignina y de la polimerización de quinonas y compuestos nitrogenados, así como de la condensación de azúcares y aminas. Otro grupo muy estable de aminoácidos y proteínas se encuentran en combinación con arcillas, lignina y otros minerales. La mineralización del nitrógeno es el proceso de transformación de nitrógeno orgánico a la forma mineral (NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻) y la inmovilización del nitrógeno es el proceso de transformación del nitrógeno inorgánico o mineral a la forma orgánica. Si el suelo se trabaja, como sucede al arar, hay un inmediato y rápido aumento de mineralización. No hay

inmovilización del nitrógeno durante el proceso de descomposición inicial (Sagan, 2001).

1.2.5.4. El humus del suelo

Hay una parte de materia orgánica en el suelo como los residuos frescos de las cosechas que se transforma mediante una serie de reacciones de descomposición, una de manera más o menos rápida y otra que es relativamente estable, que no se descompone rápidamente y al que se le denomina humus. La cantidad de humus depende de la proporción del carbono respecto del nitrógeno (Relación C/N). La relación C/N de la materia orgánica estable es aproximadamente de 10:1 (Chanoy, 1992).

La mineralización e inmovilización del nitrógeno del suelo y la velocidad de recambio de los materiales orgánicos, son afectadas por los organismos heterótrofos del suelo incluyendo las bacterias y los hongos. Su requerimiento de energía lo satisfacen mediante la oxidación de los materiales que contienen carbono. Esta descomposición de la materia orgánica aumenta con la temperatura, la humedad y la cantidad de oxígeno (Sagán, 2001).

La mineralización de los compuestos nitrogenados se produce mediante la aminización, la amonificación y la nitrificación. Los procesos de aminización y de amonificación lo realizan los microorganismos heterótrofos, quienes requieren como fuente de energía compuestos de carbono orgánicos, y el proceso de nitrificación lo realizan bacterias autótrofas, que obtienen su energía de la oxidación de sales inorgánicas y el carbono del CO₂ de la atmósfera que las rodea. Los factores que afectan al proceso de nitrificación son: el suministro del ion amonio, la población

de organismos nitrificantes, la reacción del suelo, la aireación, la humedad y la temperatura del suelo (Sagan, 2001).

1.2.6. La Deforestación

Durante miles de años, los humanos han estado jugando un papel cada vez más importante en la deforestación. A través de la historia, un imperio tras otro ha cortado bosques para construir sus barcos y viviendas, y utilizarlos como combustible. Una vez que han sido devastados, esos bosques no se han recuperado en mil años o más, y algunos nunca se recuperarán [partes del Mediterráneo, el Medio Oriente y Gran Bretaña] (Lal, 1998).

Según la FAO (2005) en la Amazonía peruana la cantidad de biomasa aérea se encuentra entre 100 y 400 toneladas por hectárea. Si el 50 por ciento aproximadamente de la biomasa es carbono, los resultados indican que existe un contenido promedio entre 50 y 200 toneladas de carbono por hectárea en los bosques amazónicos peruanos. Los cálculos muestran en promedio 165.65 toneladas de carbono por hectárea, mientras que el promedio para Sudamérica es de 110 t.ha⁻¹.

Según la Estrategia Regional de Diversidad Biológica Amazónica (CAR, 2005) la Amazonía peruana abarca 782 880 km² (61 por ciento del país). Este estudio comprende a los 360 distritos ubicados en 14 departamentos de la Amazonía peruana, con una extensión cartografiada de 77 602 km².

Armas *et al.* (2009) agregan que con más de 700 000 km², la Amazonía peruana representa 61 por ciento del territorio peruano. Sus bosques almacenan más de 17 Giga toneladas de carbono que, en formato de dióxido de carbono (CO₂), equivaldrían aproximadamente a la emisión global anual de gases con efecto invernadero en el 2004. Relacionados a la biodiversidad y la regulación del ciclo

hidrológico, la conservación de bosques se ha vuelto un tema con gran actualidad tanto en el Perú como a nivel internacional.

Dourojeanni (1981), el uso de la tierra en el departamento de San Martín, de un total de 615 375 has de bosques fueron talados con fines agrícolas, solamente 137 878 has estaban en uso o produciendo y que 477 497 de has permanecían en barbecho cubiertas por bosques secundarios, es decir el 77 por ciento del área talada, lo que establece una proporción de casi 1/5 de área en producción con relación a la superficie total desmontada. De esto se podría establecer que el periodo medio de rotación (en caso de que éste funcionara) es de 3 años únicamente, lo cual definitivamente es muy corto para permitir una recuperación de la capacidad productiva del suelo y, en consecuencia, una acelerada pérdida de productividad de los suelos (FAO, 2001).

De acuerdo a la clasificación de capacidad de uso mayor de la tierra, en el Perú el 80 por ciento del total son tierras aptas para la producción forestal y tierras de protección, así mismo; no se tiene certeza del porcentaje de bosques que cuenten con algún tipo de derechos. De estas, dos tercios de la superficie de bosque cuenta con ordenamiento territorial y han sido catalogadas como bosques de producción permanente (20 millones de hectáreas); áreas protegidas (16.3 millones de hectáreas); tierras tituladas a comunidades nativas en la selva (10.9 millones de hectáreas) y, más de 6 millones de hectáreas de superficie forestal en otras categorías (Che Piu y Menton, 2013).

El Perú cuenta con 73,3 millones de hectáreas de bosques, con esta superficie se ubica en el segundo lugar en extensión de bosques naturales a nivel de Sudamérica y en el noveno lugar a nivel mundial; esto representa cerca del 60 por ciento del territorio peruano. Aunque se trate de un país con grandes bosques, el sector forestal contribuye solo el 1,1 por ciento del producto interno bruto (MINAM, 2013).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) menciona que la principal fuente de emisiones de GEI a nivel nacional es el cambio de uso de tierras de bosques a pasturas. Según dicho documento, 110 368 Gg de CO₂ es el resultado de la deforestación en la Amazonía por cambiar el uso de la tierra con fines agrícolas. A su vez, señala que el sector forestal es la principal y única fuente de remoción de los gases de efecto invernadero (GEI).

Para la categoría UTCUTS (Orientación sobre las Buenas Prácticas para Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura), el inventario nacional ha proyectado las emisiones en 43 116 Gg de CO₂ al 2010, lo que representa una reducción de 24 por ciento en 10 años. Sin embargo, para el 2020 ha estimado que las emisiones serían de 58 377 Gg, lo que equivale a un 35 por ciento de aumento en los siguientes 10 años. Finalmente ha proyectado en 138 074 Gg las emisiones del 2050, lo que significa un 137 por ciento de aumento en los subsiguientes 30 años (MINAM, 2010). Asimismo, el MINAM publicó un análisis de la deforestación en la Amazonía hasta 2011 con imágenes Landsat 5 y Landsat 7 con una resolución de 30 m x 30 m. Los resultados de este análisis indican una tasa de deforestación de 108 571 ha del 2009 al 2010 y de 103 380 ha del 2010 al 2011. Asimismo, existen las estimaciones de carbono fijado para el periodo de evaluación del 2002 al 2008 con de 377 813) recibiendo solamente el 0.01 por ciento de la inversión extranjera directa (MINAM, 2013).

La deforestación global se ha acelerado dramáticamente en décadas recientes. Los bosques tropicales de América del Sur y del Sudeste de Asia están siendo cortados y quemados a una tasa alarmante para ser destinados a usos agrícolas, tanto en pequeña como en gran escala, desde enormes plantaciones de palmera aceitera (*Elaeis guineensis* - Arecaceae) hasta la agricultura de subsistencia de "tumba y quema". Los fuegos que se inician para estos propósitos frecuentemente arden fuera de control. La llamada "Bruma" en el Sudeste de Asia fue el resultado de

incendios forestales sin control en los bosques afectados por la sequía (Marcano, 2007). La idea de deforestación crea imágenes de áreas desnudas. Por esto, cuando alguien ve una fotografía de áreas "altamente deforestadas" en partes de los trópicos, se sorprenden al ver que todavía quedan muchos árboles ahí. De hecho, no parecen estar deforestadas (Lal, 1998).

Tabla 3

La deforestación en algunos departamentos de Perú

Departamento	Deforestación 2009-2010 (ha/año)	Deforestación 2010-2011 (ha/año)
San Martín	39760	30798
Loreto	24211	36200
Ucayali	16342	9942
Huánuco	12785	7778
Madre de Dios	5402	5959
Pasco	3998	3938
Amazonas	3981	4542
Cusco	740	1458
Junín	333	1847

Fuente: MINAM (2012).

La deforestación no tiene que ver solamente con la pérdida de árboles. También tiene un gran impacto sobre el ambiente. Muchas criaturas vivientes dependen de los árboles y cuando desaparecen estos árboles, igualmente desaparecen los animales (biodiversidad disminuida). Se pierden medicinas y materiales potencialmente valiosos, lo mismo que el agua y el aire limpios. Sufre la población nativa y, eventualmente, también la economía nacional. El futuro de las personas y de los bosques está interconectado (Marcano, 2007).

Los árboles también almacenan agua y luego la liberan hacia la atmósfera (proceso de transpiración). Este ciclo del agua es parte importante del ecosistema debido a que muchas plantas y animales dependen del agua que los árboles

ayudan a almacenar. Cuando se cortan los árboles, nada puede retener el agua, lo que conduce a un clima más seco. La pérdida de árboles también causa erosión debido a que no hay raíces que retengan el suelo, luego las partículas son arrastradas hacia los lagos y ríos, matando a los animales que viven en el agua (Marcano, 2007).

La deforestación lleva a un incremento del dióxido de carbono (CO₂) en el aire debido a que los árboles vivos almacenan dicho compuesto químico en sus fibras, pero cuando son cortados, el carbono es liberado de nuevo hacia la atmósfera. El CO₂ es uno de los principales gases "invernadero", el corte de árboles contribuye, además de desproteger al suelo, al peligro y efecto del cambio climático (Marcano, 2007).

Grandes poblaciones de personas muy pobres que viven en los bosques tropicales deforestados generan conflictos. Un agricultor de subsistencia no puede preocuparse por el ambiente. Pero también las naciones industrializadas destruyen grandes trechos de bosque para ganancias económicas a corto plazo. Quizá la mayor causa potencial de deforestación se manifieste en el futuro con el cambio climático. Si el efecto invernadero eleva la temperatura del planeta, los bosques no podrán seguir sobreviviendo en sus localidades presentes. Algunos tendrán que subir las laderas montañosas o migrar hacia ambientes más frescos o más húmedos (Lal, 1998).

Los principales efectos de la deforestación, según Lal (1998) son:

1.2.6.1. Efectos locales

El principal efecto local de la deforestación está relacionado a cambios del microclima y en las propiedades del suelo.

a. Cambios en el microclima: La deforestación lleva a cambios drásticos en el microclima. En general, la deforestación elimina el efecto amortiguador de la cobertura vegetal y acentúa los extremos.

Las fluctuaciones en los parámetros micro climáticos son generalmente incrementados (Por ejemplo: humedad relativa, temperatura máxima y mínima del suelo y del aire). La deforestación disminuye la efectividad de la precipitación e incrementa la magnitud e intensidad de la radiación neta que alcanza la superficie del suelo.

Lal (1998), observó que en Nigeria, en promedio, que de 10,5 a 11,5 MJ/m²/día de insolación que recibió una zona clareada comparado de 0,4 a 0,3 MJ/m²/día en el bosque durante una estación más calurosa y seca, respectivamente. No hubo diferencia apreciable en la radiación solar recibida bajo bosques durante las estaciones lluviosas y secas. La remoción de la vegetación también incrementa la velocidad del viento. La temperatura máxima del suelo de 1 a 5 cm puede ser de 5 a 20 grados centígrados o más en una zona clareada en un día a pleno sol comparado con un suelo bajo bosque. Debido a la alta evaporación, el contenido de humedad del suelo es la capa superficial es también más baja en las zonas claras que en suelos bajo vegetación forestal.

La deforestación disminuye la humedad relativa máxima, especialmente durante el mediodía. Hay también un incremento correspondiente en la

temperatura del aire, el porcentaje de evaporación. Quizá el efecto más drástico de la deforestación es sobre la temperatura del suelo (Lal, 1998).

b. Deterioro de las propiedades del suelo:

La deforestación también tiene un impacto drástico sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La magnitud de las alteraciones inducidas por la deforestación en las propiedades del suelo depende sobre los antecedentes del mismo, la densidad de árboles, de las especies del bosque y de la vegetación almacenada y los métodos usados para deforestar al bosque (Lal, 1998).

Estudios experimentales sobre los métodos de extracción forestal en todo el trópico han demostrado que la deforestación resulta en la degradación de la estructura del suelo, disminución de la porosidad de la capa superficial, incremento de la compactación y disminución del porcentaje de infiltración. Aunque el incremento de la densidad aparente puede ser solo del 10 al 20 por ciento, la reducción en la fracción del volumen de los macroporos puede causar una drástica reducción en el porcentaje de infiltración. La densificación del suelo es evidenciada por el incremento de la densidad aparente y la disminución en el porcentaje de infiltración, es más grande con la mecanización que con los métodos manuales de deforestación (Lal, 1998).

La humedad del suelo en el tiempo de la deforestación juega un rol importante en las alteraciones causadas por el rozo en las propiedades físicas del suelo. A más alta humedad en el momento del rozo del bosque, mayor es el deterioro y el efecto sobre las propiedades físicas

del suelo. Las propiedades físicas del suelo y el porcentaje de infiltración son también afectados por la quema. Un quemado intenso, como es el caso de la zona de hileras de árboles dejados para que se sequen, puede incrementar la agregación del suelo y mejorar el porcentaje de infiltración (Lal, 1998).

En suma, la deforestación afecta las propiedades físicas del suelo y la magnitud de los cambios en las propiedades químicas seguidos del rozo depende sobre la naturaleza de la vegetación, antecedentes de las condiciones del suelo y los métodos del rozo del bosque. La quema de la biomasa es el principal factor responsable de los cambios en las propiedades químicas del suelo. La agricultura migratoria no altera drásticamente el ciclo de los nutrientes pero el rozo sí. La remoción de la biomasa por un sistema mecanizado sin quema puede causar efectos adversos drásticos sobre las propiedades físicas del suelo (Lal, 1998).

La quema libera los nutrientes de las plantas inmovilizados en la biomasa. Sin embargo, la ceniza contiene mayormente cationes (por ejemplo Ca, Mg, K) y muchos elementos (N, S) que son volatilizados. La quema también libera una cantidad considerable de compuestos nitrogenados dentro de la atmósfera. La magnitud de los cambios en las propiedades del suelo depende también de la cantidad de biomasa quemada y la temperatura del suelo durante la quema (Lal, 1998).

El fuego tiene también consecuencias muy desastrosas para los animales y los insectos mueren. También los huevos, que posan en los árboles y en sus proximidades se queman. Las aves pueden salvarse; También otros animales tienen un sistema de advertencia y ellos se resguardan. Van entonces en busca de otro espacio vital y vuelven de

nuevo si proveen condiciones adecuadas para la vida. Eso puede durar algunos años. Si los árboles faltan después de un incendio, el clima se convierte más seco (Lal, 1998).

1.2.6.2. Efectos regionales

Según Lal (1998), la deforestación hidrológicamente tiene serios efectos regionales sobre el balance de las aguas, el transporte de sedimentos, la calidad del agua para el consumo, el transporte de sedimentos soluble y del carbono orgánico. Desde el punto de vista climático, afecta a las medias de la temperatura máxima y mínima, la media de la máxima y de la mínima de la humedad relativa, la escorrentía de las aguas de las zonas altas a las planicies, también afecta a la evaporación y la efectividad de las lluvias.

1.2.6.3. Efectos globales

Globalmente, la deforestación también tiene serios efectos, especialmente afecta al balance del carbono, la emisión de carbono y nitrógeno hacia la atmósfera, afecta a la temperatura y la distribución y cantidad de las precipitaciones en el planeta (Lal, 1998).

1.2.7. Agroforestería

Según Mendieta y Rocha (2007) los sistemas agroforestales son un conjunto de técnicas de manejo que incluyen combinar conocimientos de las ciencias forestales, agrícolas y pecuarias. Constituyen asociaciones de árboles, arbustos, cultivos agrícolas, pastos y animales distribuidos en tiempo y en espacio. Se fundamenta en principios y formas de cultivar la parcela, basados en mecanismos variables y flexibles en concordancia con los objetivos de producción propuestos.

Los sistemas agroforestales constituyen una excelente herramienta de gestión para desarrollar esquemas de adaptación al cambio climático. Aunque se viene trabajando en estos sistemas, se hace necesario profundizar las investigaciones en nuevas zonas del territorio nacional así como culminar con las investigaciones existentes (Mendieta y Rocha, 2007).

1.2.7.1. Características de los sistemas agroforestales

a. Árboles de uso múltiple

Un árbol de uso múltiple es el que en adición de los productos y servicios normalmente esperados como madera, influencias microclimáticas, mejoramiento de suelo, adición de materia orgánica; proporciona productos y servicios adicionales tales como fijación de N, forrajes, productos comestibles para humanos, gomas, fibras y productos medicinales (Mendieta y Rocha, 2007).

b. Sostenibilidad

Un manejo sostenible de la tierra incrementa su rendimiento integral, combina la producción de cultivos (incluidos cultivos arbóreos), plantas forestales y/o animales, simultánea o secuencialmente, en la misma unidad de tierra. La sostenibilidad de un sistema de producción corresponde a su capacidad para satisfacer las necesidades siempre en aumento de la humanidad sin afectar el recurso base del que depende el sistema (Mendieta y Rocha, 2007).

Según Palomeque (2009) un sistema agrícola, socioeconómicamente, es sostenible si cumple los siguientes requerimientos:

- Satisfacer las necesidades energéticas de los agricultores.
- Satisfacer las necesidades alimenticias de los agricultores para que puedan asegurar una dieta balanceada y adecuada.
- Fortalecer los vínculos de solidaridad entre los miembros de la comunidad local.
- Mantener o aumentar la productividad en el tiempo: *Producir conservando y conservar produciendo.*

c. Multidisciplinaridad

Palomeque (2009) reporta que la agroforestería como ciencia, involucra tres disciplinas básicas:

- La Silvicultura.
- La Agronomía.
- La Ganadería.

La idea es combinar los diferentes componentes para alcanzar un sistema de manejo que toma en cuenta los requerimientos de cada componente, mientras asegura una producción óptima.

1.2.7.2. Potencialidades de la Agroforestería

Según el CATIE (2000) las posibles ventajas y desventajas de los sistemas agroforestales con respecto al monocultivo son:

a. Ventajas:

- Mejor utilización del espacio vertical y mayor aprovechamiento de la radiación solar entre los diferentes estratos vegetales del sistema.
- Microclima más moderado (atenuación de temperaturas extremas, sombra, menor evapotranspiración y viento).
- Mayor protección contra la erosión por viento y agua (menos impacto erosivo de las gotas de lluvia y escorrentía superficial).
- Mayor posibilidad de fijación de nitrógeno atmosférico mediante los árboles.
- Mantenimiento de la estructura y fertilidad del suelo: aportes de MO, mayor actividad biológica, reducción de la acidez, mayor extracción de los nutrientes de los horizontes profundos (zonas secas).
- Ayuda a recuperar suelos degradados.
- Obtención de productos adicionales: Madera, frutos, leña, hojarasca, forrajes, etc.
- Mayor producción y calidad de las cosechas en ambientes marginales.
- Refugio para una mayor biodiversidad.
- Reducción de la diseminación y del daño de plagas y enfermedades.
- Reducción de externalidades ecológicas (contaminación de suelos y de acuíferos).

b. Desventajas:

- Disminución de la producción de cultivos cuando hay demasiados árboles.
- Pérdida de nutrientes al cosecharse la madera y otros productos para ser exportados fuera.

- Interceptación de parte de la lluvia reduciendo la cantidad de agua que llega al suelo.
- Daños mecánicos eventuales a los cultivos cuando se cosechan o se podan los árboles.
- Dificultad para las cosechas mecánicas por la presencia de los árboles.
- El microambiente no controlado puede favorecer a algunas plagas y enfermedades.

1.2.7.3. Clasificación de los Sistemas Agroforestales

Existen varios criterios para la clasificación de los sistemas agroforestales de acuerdo con el arreglo temporal y espacial de sus componentes, la importancia y rol de estos componentes, los objetivos de la producción del sistema y el escenario económico social. Hay dos categorías básicas de sistemas agroforestales: (a) Simultáneos y (b) Secuenciales (Palomeque, 2009).

a. Sistemas Agroforestales Secuenciales

En estos sistemas existe una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos; incluye formas de agricultura migratoria con la intervención o manejo de barbechos y los sistemas Taungya, método de establecimiento de plantaciones forestales en los cuales los cultivos anuales se llevan simultáneamente con las plantaciones de árboles, hasta que el follaje de los árboles se encuentre desarrollado (Palomeque, 2009).

En los sistemas secuenciales, las cosechas y los árboles se turnan para ocupar el mismo espacio, los sistemas generalmente empiezan con cosechas agrícolas y terminan con árboles. La secuencia en el tiempo mantiene la competencia a un mínimo, los árboles en un sistema secuencial deben crecer rápidamente cuando los cultivos no lo están haciendo, deben reciclar minerales de las capas del suelo más profundas, fijar nitrógeno y tener una copa grande para ayudar a suprimir plantas indeseables (Palomeque, 2009).

1. Agricultura Migratoria

Comprende sistemas de subsistencia orientados a satisfacer las necesidades básicas de alimentos, combustible y habitación. Solo ocasionalmente considera la fuente de ingresos por medio de la venta de los excedentes de los productos. Es un sistema en el cual el bosque se corta y se quema para cultivar la tierra en un periodo de 2 a 5 años; luego del periodo de cultivo continúa la fase de descanso o barbecho, que dura generalmente de 5 a 20 años (Palomeque, 2009).

El periodo de barbecho es necesario porque inicialmente la productividad del cultivo es elevada, ya que con la quema los nutrientes que se encontraban en la vegetación se incorporan al suelo, baja la acidez y aumenta la fertilidad del suelo, luego de 2 a 3 años de cultivo, se empobrecen los suelos, aumentan los costos de desmalezado y disminuye la productividad de los cultivos. El periodo de barbecho permite que se restablezca el reciclaje de nutrientes al ser colonizada por la vegetación secundaria (Palomeque, 2009).

2. Sistemas Taungya

Consiste en la siembra de cultivos durante la fase de establecimiento de plantaciones forestales, de frutales o de cultivos de “café” o “cacao”. Estos sistemas taungya ahorran costos en el establecimiento de las plantaciones, la obtención de la madera se logra a un costo más reducido que en las plantaciones forestales convencionales. Los cultivos participantes dan ingresos monetarios, aparte de los beneficios recibidos de las cosechas. Estos sistemas permiten una mejor utilización del espacio y del suelo, mejor protección y reducción del costo de limpieza de las plantaciones establecidas (Mendieta y Rocha, 2007).

Las ventajas de este sistema son:

- Menor costo de las plantaciones forestales y más ingresos por las cosechas.

Las desventajas son:

- Se retarda los beneficios de la vegetación forestal.
- El diseño de plantaciones no siempre es el adecuado y la presencia de árboles impide la utilización de la maquinaria para los cultivos.

c. Sistemas Agroforestales Simultáneos

En estos sistemas todos los componentes se encuentran presentes en el mismo tiempo, siendo fácil la identificación. En este sistema simultáneo, los árboles, las cosechas agrícolas o los animales crecen

juntos, al mismo tiempo y en el mismo pedazo de terreno, donde los árboles compiten por luz, agua y nutrientes y la competencia es minimizada por el espaciamiento. Los árboles no deben crecer tan rápido cuando las cosechas también están creciendo rápido, deben tener raíces más profundas que de los cultivos, con un dosel pequeño para no hacer demasiada sombra (Palomeque, 2009).

1. Árboles en asociación con cultivos perennes. Consiste en la combinación simultánea de árboles con cultivos perennes, tales como “café” (*Coffea arabica*) y “cacao” (*Theobroma cacao*). La elección de árboles para sombra depende de la necesidad de diversificar la producción.

2. Cultivo en el bosque. Se manejan cultivos de alto valor comercial bajo la protección del dosel o follaje de los árboles. Si es necesario, el follaje se modifica para proveer el nivel correcto de sombra, teniéndose en cuenta las siguientes interrogantes: ¿Qué cultivos se producen o producían tradicionalmente utilizando este sistema? ¿Qué beneficios se obtienen?

3. Cultivo en callejones. En un sistema de cultivo en callejones se mantiene un cultivo simultáneamente con árboles. El cultivo puede cosecharse anualmente mientras que los árboles maduran. Algunas especies de árboles apropiados para este sistema incluyen: árboles nativos, lo que eventualmente proveerán de madera de alta calidad. Otra opción incluye la siembra de árboles frutales (Mendieta y Rocha, 2007).

Generalmente son sistemas de cultivos intercalados donde el árbol contribuye con productos adicionales, mejora el suelo y el

microclima y sirve de tutor para plantas enredaderas. Dentro de las plantas enredaderas tenemos a la “pimienta” (*Piper nigrum*) o la “vainilla” (*Vanilla planifolia*). Los árboles pueden ser especies maderables como el *Cordia alliodora* o *Cedrela odorata*, especies de leguminosas como el *Inga* spp. y *Erythrina* spp. o frutales como *Citrus* spp o *Persea americana*. La “papaya”, comercialmente valiosa, es melífera, la cassia, fija nitrógeno y es melífera. La “toronja”, comercialmente valiosa, es también melífera (Mendieta y Rocha, 2007).

Entre las especies forestales que más se adaptan al sistema están las siguientes plantas: *Inga edulis*, *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea*, *Leucaena leucocephala* y *Schizolobium parahyba* (Mendieta y Rocha, 2007).

4. Árboles en asociación con cultivos anuales. Estos sistemas se prestan para especies anuales tolerantes a la sombra. Sin embargo, para esta misma categoría, para el caso particular de los cultivos en callejones se puede utilizar especies que no toleran la sombra. Estos sistemas incluyen cultivos como el “maíz”, “frijol”, “soya” y “maní”, en asociaciones con árboles fijadores de nitrógeno (Mendieta y Rocha, 2007).

5. Huertos caseros mixtos. Mendieta y Rocha (2007), agregan que estos huertos se encuentran alrededor de las casas de los agricultores y son mantenidos por los miembros de la familia y sus productos son dedicados principalmente al consumo familiar. Son mezclas de muchos estratos como árboles, arbustos, bejucos, cultivos perennes y anuales, animales (especialmente cerdos y gallinas), para generar

productos de uso familiar. Estos alimentos tienen una función de seguridad por ser complementos de los productos básicos. Los huertos tienen una huella cultural, donde se registra la presencia de determinadas especies y variedades vegetales, especies y razas de animales y manejo agro zootécnico, basados en patrones culturales. Con este sistema se crea un ambiente agradable para la casa ya que incorpora plantas medicinales, árboles maderables y para leña, plantas forrajeras frutas diversas y plantas aromáticas de uso doméstico (Mendieta y Rocha, 2007).

6. Sistemas Silvopastoriles. La actividad silvopastoril se enfoca a optimizar la producción pecuaria, las oportunidades para la finca, a mejorar la calidad del alimento y a la vez, generar un ingreso adicional (madera y animales). Los sistemas silvopastoriles, son asociaciones de árboles maderables o frutales con animales, con o sin la presencia de cultivos. Son prácticas a diferentes niveles, desde las grandes plantaciones arbóreas-comerciales con inclusiones de ganado o con complemento a la agricultura de subsistencia (Palomeque, 2009).

Mendieta y Rocha (2007) señalan las siguientes interacciones entre los componentes del sistema:

- La presencia del componente animal cambia y puede acelerar algunos aspectos del ciclaje de nutrientes.
- Si la carga animal es alta, la compactación del suelo puede afectar la composición del bosque.
- Los animales participan en la disseminación de semillas, favoreciendo la germinación.

- Las preferencias alimenticias de los animales pueden afectar la composición del bosque. Los árboles proporcionan un microclima especial para los animales (sombra).

7. Asociación de árboles con pastos. Según Palomeque (2009) el objetivo principal es la ganadería, en forma secundaria se logra la producción de madera, leña y frutos y otras partes del árbol. Se corta parcelas de bosque para destinarlas a la ganadería, dejando en pie árboles valiosos con el “cedro rojo” (*Cedrela odorata*), “laurel” (*Cordia alliodora*), “guayaba” (*Psidium guajava*). De esta manera los árboles que quedan en las parcelas son utilizados para sombra y refugio del ganado, además de proveer de leña.

8. Pastoreo en plantaciones forestales y frutales. Puede ser en plantaciones de árboles para leña, maderables o frutales. Con este sistema se logra el control de malezas y se obtiene un producto animal durante el crecimiento de la plantación. Algunos puntos que se deben tomar en cuenta para el manejo de este tipo de sistemas, son:

- Si los animales se encuentran en una plantación de frutales, evitar que dañen la cosecha.
- Si se siembra una pastura en la plantación, la sombra puede reducir la tasa de crecimiento del pasto.
- Los efectos de la alelopatía (plantación de *Eucaliptus* spp.) o de un cambio de pH del suelo (*Pinus* spp.), puede afectar el crecimiento del pasto
- Los animales pueden defoliar o dañar a los árboles de la plantación sino se maneja adecuadamente.

- 9. Plantaciones en línea.** La mezcla de árboles, cultivos y/o animales, pueden tomar muchos modelos y formas, desde los surcos alternos de cultivos y árboles podados para cercos, hasta animales pastando debajo de los árboles. Entre las técnicas relacionadas con la agricultura y la ganadería, principalmente para proteger a los cultivos y/o ganado, se han desarrollado las cortinas rompevientos y los cercos vivos.
- 10. Cercos vivos.** Incluyen el uso de árboles y arbustos, junto con otros componentes para formar hileras entre callejones para la siembra de cultivos anuales. Se utilizan principalmente para mejorar el suelo (fijación de N, *mulch*) y /o reducir la erosión en terrenos en pendiente. Consiste en la siembra de leñosas para la delimitación de los potreros, casi siempre complementadas con el uso de alambre de púas. Las cercas vivas con un adecuado manejo son útiles para reemplazar las cercas de alambre, duran más tiempo y disminuyen los costos. Con cierta frecuencia es necesario podar, eliminar y reemplazar árboles viejos o enfermos. El establecimiento de cercas implica una reducción en costos con respecto a las cercas muertas, reduce la presión sobre el bosque por la búsqueda de postes y de leña y además ofrece follaje en cantidad y calidad durante la época seca, además de ofrecer frutas (Palomeque, 2009).

Las especies más utilizadas como cercas vivas son: *Acacia* spp, *Agave angustifolia*, *Agave lophanta*, *Agave americana*, *Annona cherimolia*, *Bromelia pinguin*, *Caesapinia spinosa*, *Casuarina cunninghamiana*, *Cordia alliodora*, *Cordia dentata*, *Cupressus* spp, *Opuntia* spp, *Sambucus* spp, *Prunus seratina*, subsp. *capulí*, *Yucca*

elephantipes, *Leucaena* spp, y muchas especies propias de la zona donde se trabaja (Palomeque, 2009).

11. Cortinas rompevientos. Las cortinas forestales cortavientos o de protección son una de las alternativas que ofrecen las prácticas agroforestales con fines productivos y de protección ambiental. Se definen como el establecimiento de una o más hileras de árboles y/o arbustos dentro de un predio.

Según Palomeque (2009), algunos beneficios de las cortinas rompevientos son:

- Otorgar protección y mejorar la productividad de los cultivos.
- Disminuir la erosión del suelo evitando la pérdida de su fertilidad.
- Incrementar el peso y la sobrevivencia de los animales en invierno al disminuir la velocidad del viento y aumentar la temperatura.
- Otorgar protección a los cursos de agua y aumentar la biodiversidad.
- Proteger galpones, corrales, casas y otras infraestructuras.
- Disminuir la erosión del suelo evitando la pérdida de su fertilidad.
- Incrementar el peso y la sobrevivencia de los animales en invierno al disminuir la velocidad del viento y aumentar la temperatura.
- Otorgar protección a los cursos de agua y aumentar la biodiversidad.
- Proteger galpones, corrales, casas y otras infraestructuras.
- Disminuir las necesidades energéticas de los hogares protegidos, abaratando costos de calefacción.

- Proporcionar productos forestales como madera, postes, leña y productos forestales no madereros (PFNM).
- Aumentar la rentabilidad del predio y mejora ambiental y productiva.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la Investigación

2.1.1. Lugar Fecha de Ejecución

El presente trabajo de investigación se desarrolló en dos distritos de la provincia de Rioja, en la región San Martín. El primer lugar de muestreo fue en el distrito de Segunda Jerusalén sector de Tioyacu en el predio de propiedad de la Empresa Inversiones NCN S.A.C. (BC: Bosque de caoba y BE: Bosque de Eucalipto) con plantaciones de 3 años. El segundo lugar de muestreo fue en el distrito de Nueva Cajamarca, caserío la Esperanza (AD: Área degradada) y el Fundo Agroforestal de propiedad del señor Marco Cosme en el centro poblado de Naranjillo (Agroforestería: E+C: Eucalipto+café, CI+C: Cedro+café), las plantaciones de café tienen 4 años y las plantas forestales tales como el “eucalipto” y el “cedro” de la india tienen 3 años.

Los distritos de Nueva Cajamarca y Segunda Jerusalén se encuentran en la provincia de Rioja en la parte Nororiental de la Región San Martín, localizado a 10°43'10'' de Latitud Sur y 75°16'10'' de Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich, a una altitud promedio de 875 msnm, con temperaturas media entre 22°C a 32°C y una mínima de 16°C en el mes de junio, con precipitaciones anuales que oscilan entre 1 000 y 1 400 mm al año. Las precipitaciones pluviales tienen dos épocas bien marcadas durante el año: Una lluviosa entre los meses de

Diciembre a Mayo, y otra aparentemente seca en los meses de Junio y Noviembre debido a la precipitación temporal, con una radiación moderada por la nubosidad frecuente que sigue la misma tendencia que la precipitación pluvial, es decir, se incrementa en los sectores cercanos a las estribaciones de la cordillera (SENAMHI, 2014).

Tabla 4

Datos Meteorológicos del distrito de Nueva Cajamarca. Promedio de 10 años (2005-2014)

Meses	Precipitación (mm)	Temperatura en °C			Humedad relativa (%)	Nubosidad (h)
		Máxima	Media	Mínima		
Enero	152.8	25.5	22.9	20	83.5	3.57
Febrero	175.0	25.0	22.8	19.5	84.1	3.31
Marzo	205.5	26.5	23.1	18.3	83.8	3.49
Abril	173.4	27.6	23.4	17.8	83.6	3.19
Mayo	128.8	27.5	23.4	19.5	82.1	3.10
Junio	84.0	26.4	23.1	18.8	82.3	2.99
Julio	80.6	27.9	22.8	20.3	80.6	2.71
Agosto	88.3	28.8	23.2	20.4	79.1	2.97
Setiembre	106.7	27.3	23.1	18.6	80.5	2.74
Octubre	176.9	27.0	23.6	19.8	81.3	3.02
Noviembre	186.5	26.0	23.8	20.8	81.0	2.86
Diciembre	159.3	25.3	23.3	19.7	82.5	3.09
Total/prom.	1,717.8	26.7	23.2	19.5	82.0	3.10

Fuente: Senamhi (2014)

El Distrito de Nueva Cajamarca tiene una humedad relativa variable entre 79 por ciento a 84 por ciento, por lo que la zona en estudio corresponde a un régimen húmedo y semicálido. Fisiográficamente presenta llanuras aluviales angostas a lo largo de los ríos, montañas, laderas y terrazas intermedias, así como zonas empinadas y muy escarpadas; también muestran quebradas, riachuelos y en algunas partes poseen buenos suelos aunque con limitaciones en el drenaje (SENAMHI, 2014).

La zona en estudio ecológicamente está ubicada en la zona de vida de Bosque muy Húmedo Premontano Tropical, que se caracteriza por las siguientes condiciones: Presenta un ecosistema de características húmedas, debido al incremento de las precipitaciones y a la disminución de las temperaturas, con altitudes entre los 650 a 1000 msnm aproximadamente, su relieve se caracteriza por tener sectores montañosos, donde no se observan asentamientos humanos ni de comunidades nativas como consecuencia posiblemente de las limitaciones vinculadas a los factores climático, edáfico y topográfico (SENAMHI, 2014).

La temperatura promedio anual es de 23°C. Abarca las zonas altas de la Selva Alta y gran parte de la Ceja de Selva, los suelos son de origen aluvial o coluvial, no inundables y son continuación de las terrazas medias. La altura respecto al nivel de base fluctúa de 10 a 20 metros de alto. La vegetación predominantemente es arbóreo denso, de fustes bien conformados, redondos y rectos, pudiendo llegar a alturas comerciales promedio de 17 m de alto aunque algunas especies pueden sobrepasar los 35 m de alto, de copas amplias y densas, destacando especies como: “cachimbo caspi”, “mullaco”, “shambo caspi”, “moena amarilla”, “moena colorada”, “rifari”, “catahua”, “papelillo caspi”, asociadas con palmeras de “huacrapona”, “ungurahui”, “chambira” y “yarina” entre otras, con sotobosque semidenso a ralo compuestos mayormente por la regeneración natural de “ungurahui”, “yarina”, “moena amarilla”, “uvilla”, etc.

De acuerdo al Mapa Geológico del Perú del Instituto de Geología y Minería (1975), el distrito de Segunda Jerusalén donde se encuentra los puntos de muestreo (1) BC (Bosque de capirona) y (2) BE (Bosque de eucalipto) corresponde a la Formación Geológica Sarayaquillo, los puntos (3) E+C (Agroforestería: Eucalipto más café) y (4) CI+C (Agroforestería: Cedro de la India más café) corresponden a Depósitos Aluviales Recientes y el punto de muestreo (5) AD (Área degradada) corresponde a Depósitos Aluviales Pleistocénicos.

La principal actividad de los pobladores de Nueva Cajamarca y Segunda Jerusalén es la agricultura en mayor porcentaje, la ganadería, comercio y turismo en menor escala. Los principales cultivos son el “arroz” (*Oryza sativa*), “café” (*Coffea arabica*) con 45,000 hectáreas aproximadamente, además de diversos cultivos como los cítricos, “maíz”, verduras, etc.

El presente trabajo de investigación se inició el mes Julio del año 2015 y culminó en el mes de Mayo del año 2016.

2.1.2. Población y Muestra

La población estuvo compuesta por los suelos que soportan el desarrollo de especies forestales y con prácticas de agroforestería, comparadas con un área degradada, ubicados en la Provincia de Rioja de la Región San Martín.

La muestra fue representada por los suelos estudiados en los puntos de muestreo, ubicados las parcelas de observación previamente fijados en el mapa base de la Provincia de Rioja (Apéndice 3).

Tabla 5

Sistemas en estudio y puntos de muestreo

SISTEMA	PUNTO DE MUESTREO (Número de calicata)
1) Bosque de capirona: BC	SEGUNDA JERUSALEN Calicata 01
2) Bosque de eucalipto: BE	SEGUNDA JERUSALEN Calicata 02
3) Agroforestería: Eucalipto+café: E+C	NARANJILLO Calicata 03
4) Agroforestería: Cedro de la India+café: CI+C	NARANJILLO Calicata 04
5) Área degradada: AD	LA ESPERANZA Calicata 05

Fuente: Elaboración propia

2.1.3. Tipo y Método de Investigación

La investigación fue de tipo aplicada porque se utilizaron teorías para estimar el stock o reservas de carbono en los suelos de la zona en estudio.

El método consistió en el análisis de datos para la interpretación de los resultados obtenidos, la síntesis que permitió estructurar y ordenar los datos, la observación como parte de procedimiento en la toma de la información requerida y la descripción para ordenar e identificar la correlación entre las variables estudiadas.

2.1.4. Diseño de la Investigación

El estudio fue de tipo no experimental basado en la información obtenida y correlacionada con el trabajo de campo, los análisis de laboratorio y la interpretación de esta información en el gabinete.

2.1.5. Descripción de la Investigación de Campo

El estudio comprendió las siguientes fases:

2.1.5.1. Fase Preliminar:

- Reconocimiento del área en estudio.
- Acopio de información bibliográfica.
- Elaboración del mapa base de la zona con la ubicación de los puntos de muestreo.

2.1.5.2. Fase de Campo:

- Construcción de cinco calicatas de acuerdo a los puntos de muestreo fijados en el mapa base de la zona en estudio.
- Descripción morfológica de los perfiles de suelos en los puntos de muestreo considerados en el mapa base (Apéndice 3),
- La toma de datos se realizó una vez preparadas las respectivas calicatas, haciéndose la descripción de las características morfológicas y edáficas de cada uno de los puntos de muestreo, dándose énfasis a las propiedades físicas, químicas y biológicas del subsistema suelo, teniéndose en cuenta los siguientes aspectos:

a. Características Generales:

Número de calicata, asociación, serie, clasificación natural, localidad, material madre, fisiografía, relieve, altitud, pendiente, erosión, distribución de raíces, salinidad, pedregosidad superficial, clasificación técnica y taxonómica, clima, vegetación o cultivo, permeabilidad, drenaje, escorrentía superficial, napa freática, humedad, porosidad y alcalinidad (Apéndice 2).

b. Descripción del perfil:

Horizonte, profundidad, color, textura, modificadores texturales, estructura, consistencia, pH, CO₃ y límite (Apéndice 2).

Toma de muestras de cada perfil para sus análisis respectivos, considerándose tres profundidades de muestreo: de 0 a 20 cm, de 20 a 40 cm y 40 a 60 cm.

2.1.5.3. Fase de Laboratorio:

En esta fase se analizaron las muestras de suelos tomadas en la fase anterior, considerándose todas las variables a estudiar. Los análisis de caracterización de los suelos se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Programa Especial del Alto Mayo (PEAM) (2015), de la Región San Martín, de acuerdo a las siguientes metodologías:

- La reacción de suelo fue medida mediante el Método del Potenciómetro y los resultados están en rangos de pH (Ortiz y Ortiz, 1990).
- La determinación del carbono orgánico se basó en el método de Walkley y Black, que consiste en oxidar los materiales orgánicos del suelo con dicromato de potasio en un medio ácido. Posteriormente se calculó el potasio que no se ha reducido. Los resultados se expresados en % de carbono orgánico (Mehlich, 1984).
- La determinación del nitrógeno total del suelo fue mediante el Método del Kjeldahl, en el cual las muestras de suelo se sometieron a una digestión ácida que da como resultado la transformación de todas las formas orgánicas del nitrógeno en N-amoniacal. Luego el nitrógeno fue

estimado mediante la destilación por arrastre con vapor. Los resultados están dados en % de N total del suelo (Lachat Instruments, sin fecha).

- La conductividad eléctrica (CE) fue determinada por el Método del Salómetro, que consiste en preparar un sustrato diluyendo 20 g de suelo en 20 ml de agua, de cuyo sustrato se hicieron las lecturas correspondientes. Los resultados están expresados en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (PEAM, 2015).
- La Densidad aparente fue determinada por el Método de la Probeta que consistió en relacionar la masa del suelo (peso) sobre el volumen total del mismo y expresado en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Bullón, *et al.* 1990).
- La cantidad de dióxido de carbono presente en el suelo como producto de la descomposición e incorporación de la biomasa producida por los diferentes tipos de vegetación, fue calculada en base a los datos proporcionados por el PEAM (2015). Apéndice 6.

Tabla 6

Mensuración de las Variables en Estudio

Variable	Mensuración	Método
Carbono orgánico	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Walkley y Black
Nitrógeno total	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Kjeldalh
Densidad aparente	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Probeta
Dióxido de carbono:CO ₂	$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$	PEAM

Fuente: PEAM (2014)

2.1.5.4. Fase de Gabinete:

En esta fase se hicieron las tabulaciones y procesamiento de los datos obtenidos tanto en el campo como en el laboratorio y luego de hacerse las interpretaciones se concluyó con la redacción del informe final.

2.1.6. Identificación de Variables

Tanto la evaluación de los factores edáficos y fisiográficos, y la caracterización y descripción de perfiles se hicieron de acuerdo al Manual de Descripción y Muestreo de Suelos del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Field Book for Describing and Sampling Soils, Natural Resources Conservation Service (Nebraska, USA), propuesto por Schoeneberger *et al* (1998), (Apéndice 1) y las en estudio son las siguientes:

Tabla 7

Variables en Estudio

Variables	Profundidad de estudio
V1: Contenido de carbono orgánico en el suelo: (g.kg⁻¹)	P1: de 0 a 20 cm.
	P2: de 20 a 40 cm.
	P3: de 40 - 60 cm.
V2: Contenido de nitrógeno en el suelo: (g.kg⁻¹).	P1: de 0 a 20 cm.
	P2: de 20 a 40 cm.
	P3: de 40 - 60 cm.
V2: Contenido de CO₂ retenido en el suelo: (t.ha⁻¹)	P1: de 0 a 20.
	P2: de 20 a 40 cm.
	P3: de 40 - 60 cm.

Fuente: Elaboración propia

2.2. Materiales y Equipos

2.2.1. Material Cartográfico

- Carta Nacional a escala 1:100 000.
- Mapa Topográfico de la Provincia de Rioja a escala 1: 50 000.
- Mapa Ecológico del Perú a escala 1 100 000.
- Mapa Geológico del Perú.
- Mapa base de Nueva Cajamarca

2.2.2. Material de Campo

- Tabla de colores de suelos Munsell
- Tarjetas de observación edáfica.
- Ácido clorhídrico.
- Bolsas de polietileno.
- Pico, pala, barreno, machetes, tijeras de podar.
- Regla graduada.
- Libreta de campo.

2.2.3. Equipos

- Cámara digital.
- GPS.

2.2.4. Material de Gabinete

- Equipo de cómputo.

- Discos compactos.
- Materiales de escritorio y de dibujo.
- Textos de consulta.

2.3. Refinamiento de Datos

Tabla 8
Refinamiento de Datos

CALICATA/ PROFUNDIDAD	LUGAR	PROFUNDIDAD (cm)	C ORGÁNICO (%)	N (g.kg ⁻¹)	CO ₂ CAPTURADO (t.ha ⁻¹)
01:		0-20			
		20-40			
		40-60			
02:		0-20			
		20-40			
		40-60			
03:		0-20			
		20-40			
		40-60			
04:		0-20			
		20-40			
		40-60			
05:		0-20			
		20-40			
		40-60			

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PEFILES ESTUDIADOS

3.1.1. Calicata 01: Bosque de Capirona (BC)



Figura 5: Fotografías del perfil del suelo y el paisaje del bosque de Capirona

a. Características generales

Suelos azonales en etapa de desarrollo de materiales derivados de areniscas, ubicadas en un área de topografía moderadamente empinada. Son suelos moderadamente profundos, con perfiles con incipiente desarrollo genético tipo A(B)C. De aptitud forestal media (F2es) por su capacidad de uso mayor, ubicados en localidad de Segunda Jerusalén. Taxonómicamente son del Sub

Grupo Fluventic Eutrudepts, Gran Grupo Eutrudepts, Sub Orden Udepts, Orden Inceptisol. Fisiografía en ladera, de colina alta (Cordillera Sub Andina de relieve montañoso, colinas bajas ligera a moderadamente disectadas). Relieve ondulado, con pendiente ligeramente inclinada (8 por ciento), moderada erosión, distribución regular de raíces (60 cm), sin problemas de salinidad ni de pedregosidad, vegetación reforestada constituida por árboles de “capirona” (*Calycopyllum spruceanum*) y diversos pastos. Escorrentía superficial lenta, napa freática a 60 cm de la superficie, excesiva humedad, buena porosidad, 833 msnm, UTM: 18M 0246900 Este, 9337674 Norte.

b. Descripción del perfil

PROFUNDI- DAD (cm)	CARACTERISTICAS
0 – 20	Horizonte mineral de textura moderadamente fina (franca limosa), color negro (10 YR 3/1), bloques angulares medios, de consistencia friable, permeabilidad muy lenta, pH neutro (7,2), contenido medio de materia orgánica (23,87 g.kg ⁻¹).
20 – 40	Horizonte mineral de textura media (franco), color marrón rojo oscuro (2.5 YR 3/2), estructura en bloques subangulares medios, de consistencia friable en húmedo, permeabilidad muy lenta, pH neutro, contenido medio de materia orgánica (20,17 g.kg ⁻¹), con límite difuso.
40 – 60	Horizonte mineral de textura media (franco), marrón grisáceo oscuro (10 YR 4/2), bloques subangulares medios, firme en húmedo, permeabilidad muy lenta, moderadamente neutro (pH 5,97), bajo contenido de M.O. (7,73 g.kg ⁻¹).

3.1.2. Calicata 02: Bosque de Eucalipto (BE)



Figura 6: Fotografías del perfil del suelo y el paisaje del bosque de eucaliptos

a. Características generales

Suelos azonales desarrollados de materiales derivados de areniscas calcáreas, ubicadas en áreas de topografías moderadamente empinadas. Son suelos moderadamente profundos, con perfiles con incipiente desarrollo genético tipo A(B)C, de aptitud forestal media (F2es), ubicados en la zona de Segunda Jerusalén. Taxonómicamente son del Sub Grupo, Typic Dystrudepts, Gran Grupo Dystrudepts, Sub Orden Udepts, Orden Inceptisol. Fisiografía de ladera ondulada, de colina alta (Cordillera Sub Andina de relieve montañoso a colinado, colinas bajas ligera a moderadamente disectadas). Pendiente ligeramente inclinada (8 por ciento), moderada erosión, distribución superficial de raíces (50 cm), sin problemas de salinidad y ligera pedregosidad superficial, vegetación constituida por “eucaliptos” (*Eucalyptus torelliana*), plantados con fines de reforestación, “anona” (*Annona squamosa*) y diversas malezas entre gramíneas y leguminosas. Escorrentía superficial lenta, napa freática

ligeramente profunda, humedad excesiva, moderada porosidad, 837 msnm, UTM: 18M 0246789 Este, 9337674 Norte.

a. Descripción del perfil

PROFUNDIDAD (cm)	CARACTERÍSTICAS
0 – 20	Horizonte mineral de textura media (Franco), color marrón rojizo oscuro (5 YR 3/3), bloques subangulares medios, de consistencia friable en húmedo, permeabilidad lenta, moderadamente ácido (pH 5,93), contenido bajo de materia orgánica (18.72 g.kg ⁻¹), con límite difuso.
20 – 40	Horizonte mineral de textura media (franco), color marrón rojizo oscuro (5 YR 3/4), bloques subangulares medios, de consistencia friable en húmedo, permeabilidad lenta, moderadamente ácido (pH 5,82), contenido bajo de materia orgánica (7,02 g.kg ⁻¹), con límite difuso.
40 – 60	Horizonte C constituido por gravas y cantos rodados de tamaño medio y gravillas concrecionadas. Es el material madre.

3.1.3. Calicata 03: Agroforestería: Eucalipto+Café (E+C)



Figura 7: Fotografías del perfil del suelo y el paisaje del sistema de agroforestería café+eucalipto

d. Características generales

Suelos azonales, Inceptisols (Fluventic Eutrodepts), de aptitud agrícola baja (A3s), con incipiente desarrollo pedogenético [A(B)C], ubicados en la localidad de Naranjillo, Nueva Cajamarca. Material madre aluvial antiguo, buen drenaje, moderadamente profundos, terraza plana, pendiente moderadamente ondulada (10 por ciento), moderada erosión, distribución regular de raíces (50 cm), sin problemas de salinidad y de muy ligera pedregosidad superficial, vegetación constituida por la asociación de cultivos de “café” (*Coffea arabica*) asociado con “eucaliptos” (*Eucalyptus torelliana*.), napa freática semiprofunda, excesiva humedad, moderada porosidad, 893 msnm, UTM 18M 0234861 Este, 9356521 Norte.

a) Descripción del perfil

PROFUNDIDAD (cm)

CARACTERÍSTICAS

0 – 20 cm	Horizonte mineral de textura media (franco limosa), color rojo muy oscuro (2.5 YR 2.5/2), bloques subangulares medios, de consistencia firme en húmedo, permeabilidad moderada, moderadamente básico (pH 8,12), contenido bajo de materia orgánica (19,16 g.kg ⁻¹), con límite difuso.
20 – 40 cm	Horizonte mineral de textura media (franco), rojo claro (2.5 YR 4/2), bloques subangulares medios, de consistencia moderadamente friable en húmedo, permeabilidad moderada, ligeramente básico (pH 7,96), contenido alto de materia orgánica (24,20 g.kg ⁻¹), límite difuso.
40 – 60 cm	Material aluvial (horizonte C) pedregoso fuertemente concrecionado.

3.1.4. Calicata 04: Agroforestería: Cedro de la India+Café (CI+C)



Figura 8: Fotografías del perfil del suelo y el paisaje del sistema de agroforestería café+cedro de la India

a) Características generales

Suelos azonales ubicados en Naranjillo, Nueva Cajamarca, desarrollados de materiales aluviales antiguos, ubicadas en terrazas altas, plano a ligeramente ondulada. Son suelos moderadamente profundos, con presencia de estratos de gravilla subangular, con perfiles con incipiente desarrollo genético [A(B)C], terraza media (Cordillera Sub Andina de relieve plano a ondulado, drenaje moderado a deficiente, ubicadas en terrazas altas. Son suelos moderadamente profundos, con perfiles tipo (ABC). De aptitud agrícola baja (A3sw). Material madre grava aluvio-coluvial. Taxonómicamente pertenece al Sub Grupo Fluventic Eutrudepts, Gran Grupo Eutrudepts, Sub Orden Udepts, Orden Inceptisols. Ligeramente ondulada, pendiente llana (5 por ciento) y con moderada erosión, distribución profunda de raíces (80 cm), sin problemas de salinidad y exento de pedregosidad superficial, vegetación constituida por la asociación “cedro de la india” (*Cedrela odorata*) con “café” (*Coffea arabica*). Escorrentía superficial lenta, napa freática profunda, excesiva humedad y moderada porosidad, 894 msnm, UTM 18M 0234844 Este, 9356533 Norte.

b) Descripción del perfil

PROFUNDIDAD (cm)	CARACTERÍSTICAS
0 – 20	Horizonte mineral de textura media (Franco limosa), color marrón oscuro (10 YR 4/3), granular, de consistencia friable en húmedo, permeabilidad moderada, moderadamente básico (pH 8,35), contenido muy bajo de materia orgánica (7,73 g.kg ⁻¹), con límite difuso.
20 – 40	Horizonte mineral de textura media (franco), color rojo claro (2.5 YR 4/2), bloques subangulares medios, de consistencia friable en húmedo, permeabilidad moderada, moderadamente básico (pH 8,29), contenido bajo de materia

orgánica (14,12 g.kg⁻¹), con límite abrupto.

- 40 – 60 Horizonte mineral de media (franco) con presencia de grava gruesa, color rojo oscuro (10 R 3/2), bloques subangulares medios, consistencia firme en húmedo, permeabilidad moderada, moderadamente básico (pH 8,05), contenido medio de materia orgánica (22,19 g.kg⁻¹).

3.1.5. Calicata 05: Área Degradada (AD)

Suelos azonales ubicados en la localidad La Esperanza, Nueva Cajamarca, desarrollados de materiales aluviales calcáreos antiguos, plano a ligeramente ondulada. Son suelos moderadamente profundos, con presencia de estratos de gravilla subangular, con perfiles con incipiente desarrollo genético tipo ABC. Suelos de baja aptitud agrológica (A3sw) por su capacidad de uso mayor. Terraza media (Cordillera Sub Andina de relieve plano a ondulado, de drenaje moderado a deficiente).



Figura 9: Fotografías del perfil del suelo y el paisaje del área degradada

a) Características generales

Taxonómicamente pertenecen al Sub Grupo Fluventic Dystrudepts, Gran Grupo Dystrudepts, Sub Orden Udepts, Orden Inceptisol. ligeramente ondulada y con pendiente moderadamente inclinada (12 por ciento), severa erosión, distribución muy superficial de raíces (20 cm), sin problemas de salinidad y exento de pedregosidad superficial, vegetación constituida por plantaciones de “cacao” (*Theobroma cacao*), “anona” (*Annona squamosa*), “mandarina” (*Citrus nobilis*) y pastos naturales, características de un bosque secundario serias limitaciones debidas a la presencia de una excesiva humedad. Escorrentía superficial muy lenta, napa freática superficial, humedad excesiva, deficiente porosidad, 866 msnm, UTM: 18M 0242347 Este, 934294 Norte.

b) Descripción del perfil

PROFUNDI- DAD (cm)	CARACTERÍSTICAS
0 – 20	Horizonte mineral de textura fina (Franco arcillosa), color rojo oscuro (2.5 YR 3/2), bloques angulares medios, de consistencia friable en húmedo, permeabilidad muy lenta, moderadamente ácido (pH 5,74), contenido medio de materia orgánica (21,52 g.kg ⁻¹), con límite difuso.
20 – 40	Horizonte mineral de textura fina (franco arcillosa), color rosado grisáceo (5 YR 6/2) con evidencia de reducción del hierro (Fe ⁺²), bloques subangulares medios, de consistencia firme en húmedo, permeabilidad muy lenta, ligeramente ácido (pH 6,09) contenido muy bajo de materia orgánica (3,36 g.kg ⁻¹), con límite Abrupto.
40 – 60	Roca madre en proceso de intemperización (Rr).

3.2. Resultados de los Análisis Físico-Mecánico y Químico de los Suelos

3.2.1. Textura

La Tabla 9 muestra las clases texturales de los suelos en estudio. Al respecto se ha encontrado que esta propiedad es muy variable, encontrándose suelos franco limosos, francos y franco arcillosos.

Tabla 9

Análisis de la textura del suelo

CALICATA/PROFUNDIDAD (cm)	ANÁLISIS MECÁNICO (%)			CLASE TEXTURAL
	Arena	Arcilla	Limo	
1) BC: Bosque Capirona				
0 – 20	23,96	21,16	54,88	Franco limosa
20 – 40	27,96	25,12	46,92	Franca
40 – 60	25,92	25,16	48,92	Franca
2) BE: Bosque de Eucalipto				
0 – 20	46,40	10,16	43,44	Franca
20 – 40	46,48	14,20	39,32	Franca
40 – 60	-	-	-	
3) E+C: Agroforestería:				
Eucalipto+Café:				
0 – 20	28,44	16,20	55,36	Fco. limosa
20 – 40	38,40	16,24	45,36	Franco
40 – 60	-	-	-	
4) CI+C: Agroforestería: Cedro de la India+café				
0 – 20	34,44	6,24	59,32	Franco limoso
20 – 40	37,76	20,40	41,84	Franco
40 – 60	37,80	24,44	37,76	Franco
5) AD: Área degradada				
0 – 20	25,76	30,40	43,84	Franco arcillosa

20 – 40	31,70	30,50	37,80	Fco. Arcillosa
40 – 60	-	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 9 muestra las clases texturales de los suelos en estudio. Al respecto se ha encontrado que esta propiedad es muy variable, encontrándose suelos franco limosos, francos y franco arcillosos.

Sin embargo, como sucede en el perfil BE (Bosque de Eucalipto), son suelos de textura media (francos) tanto en la capa superficial como en las porciones subterráneas, mientras que los perfiles BC (Bosque con Capirona), E+C (Agroforestería: “eucalipto”+ “café”, y CI+C (Agroforestería: “cedro de la india”+ “café”). Son suelos de textura moderadamente fina (franco limoso) en la capa superficial y de textura media (francos) en las capas internas. El perfil AD (Área degradada) tiene una textura fina (Franco arcillosa) en todas sus capas estudiadas.

Esta condición variable de la textura de acuerdo a la condiciones climatológicas se asumiría de que existe un proceso continuo de lavaje pero esto no sucede, más parece que la constante saturación de humedad a que están sometidos estos suelos no ha permitido un desarrollo y por lo tanto presentan diferentes tipos de distribución de la textura entre las capas de un mismo perfil.

3.2.2. Reacción del Suelo (pH)

En la Tabla 10 y la Figura 10 se observan los resultados de la reacción del suelo expresado en términos de pH, notándose que dentro de las profundidades de en un mismo perfil el pH es variable. En el nivel de profundidad de 0 a 20 cm (suelo superficial), en el suelo reforestado con “capirona” (*Calycophyllum spruceanum*) el pH es neutro, en el bosque de “eucalipto” (*Eucalyptus torelliana*) el pH es

moderadamente ácido y en los suelos con plantaciones agroforestales “café” (*Cofee arabiga*) + “cedro” (*Cedrela odorata*) y “café” + “eucalipto”, el pH es moderadamente básico mientras que en el área degradada el pH es moderadamente ácido.

Del mismo modo, tanto en las profundidades de 20 a 40 cm así como de 40 a 60 cm, la reacción del suelo sigue el mismo patrón explicado para capa superficial pero notándose claramente una ligera tendencia a disminuir los valores del pH sin cambiar bruscamente. Esto permite asumir que las capas superficiales están sujetas a una continua erosión laminar y a un intenso lavaje especialmente de las bases cambiables, condición que es favorecida por el tipo de material parental y por el tipo de textura que predominan en las zonas en estudio.

Tabla 10

Análisis de la Reacción del Suelo (Rangos de pH)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capirona	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	7,20	5,93	8,12	8,35	5,74
20 – 40	7,10	5,82	7,92	8,29	6,09
40 – 60	7,23	-	-	8,05	-

Fuente: Elaboración propia.

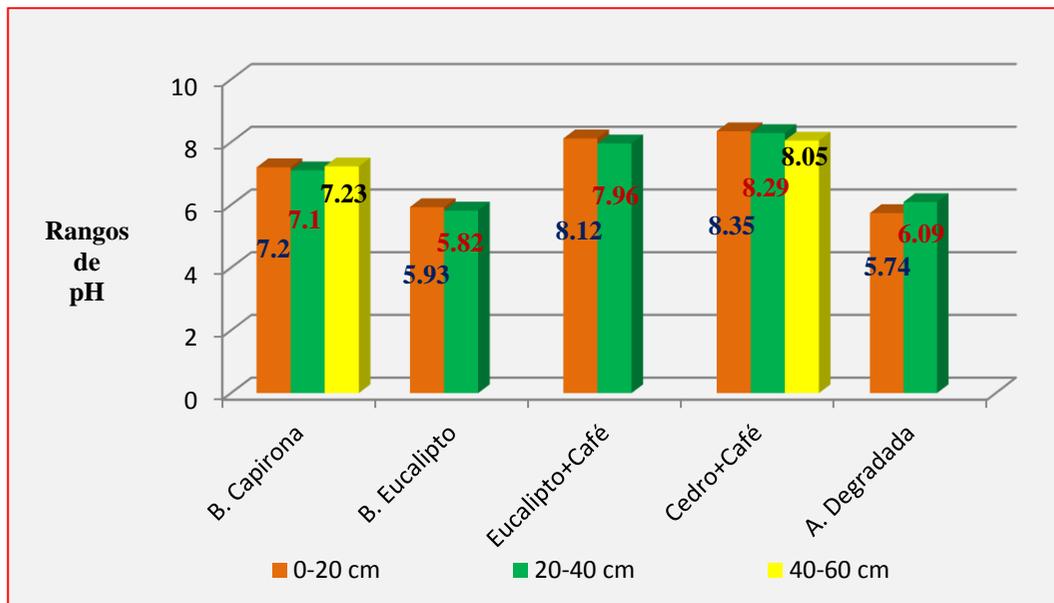


Figura 10: Resultados de la evaluación de reacción del suelo

3.2.3. Densidad Aparente

La Tabla 11 y la Figura 11 muestran los resultados de la densidad aparente de los suelos en estudio. Al respecto se observa que la densidad aparente es muy variable, es así que los perfiles del Bosque de “capirona” (BC), Area degradada (AD) y Bosque de “eucalipto” asociado con “café” (BC+C) tienen densidades que oscilan entre 1,37, 1,32 y 1,42 g. cm⁻³, resultados que están muy relacionados con el contenido de materia orgánica y que según los reportes científicos relacionados con esa propiedad, indican que la densidad aparente de los suelos tienden a bajar cuando el contenido de materia orgánica es alta, muy por el contrario en las calicatas del bosque de “cedro de la india” asociado con “café” (CI+C), los valores de la densidad son superiores con 1,57 y 1,52 g.cm⁻³, respectivamente. Estos resultados están también muy relacionados con el contenido de materia orgánica y que según los reportes científicos relacionados con esa propiedad, la densidad aparente de los suelos tienden a bajar cuando el contenido de materia orgánica es alta y tiende a tener mayores valores cuando la materia orgánica disminuye en el suelo.

Por otro lado, Ortiz y Ortiz (1990) señalan que la textura del suelo también es una propiedad que tiene influencia sobre los valores de la densidad aparente, es así que los suelos franco limosos tienen una densidad aparente menor a $1,15 \text{ g.cm}^{-1}$ y los suelos arcillosos tienen una densidad que bordea $1,27 \text{ g.cm}^{-1}$, algo similar a los valores encontrados en el presente estudio.

Tabla 11

Análisis de la densidad aparente (g.cm^{-3})

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capiroña	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	1,37	1,52	1,42	1,57	1,32
20 – 40	1,35	1,47	1,43	1,40	1,33
40 – 60	1,35	-	-	1,37	-

Fuente: Elaboración propia

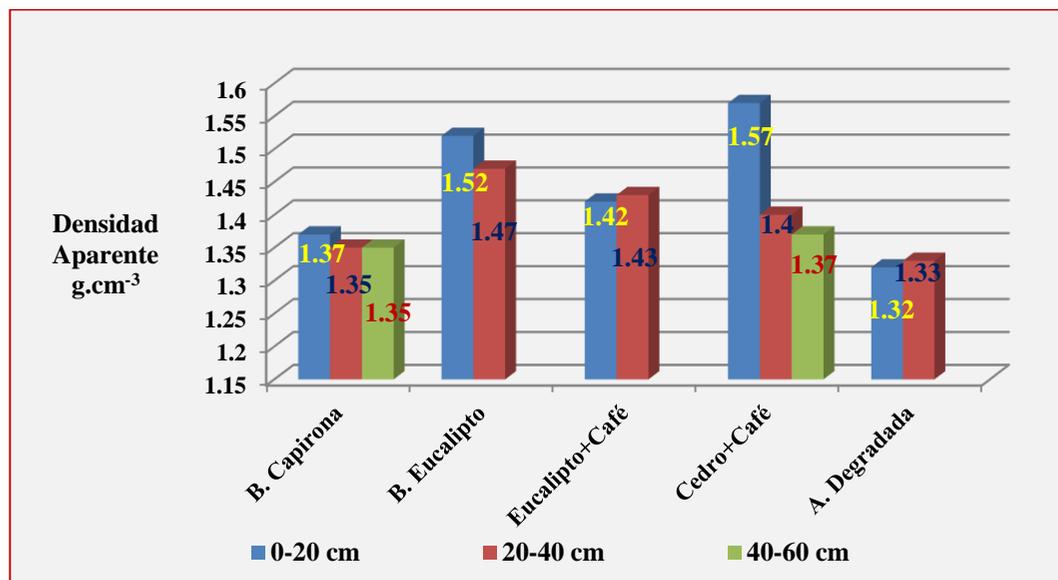


Figura 11: Evaluación de la densidad aparente

3.2.4. Conductividad Eléctrica

En la Tabla 12 y la Figura 12, se aprecian los resultados de la conductividad eléctrica de los perfiles en estudio, encontrándose valores muy bajos que oscilan entre 0,003 a 0,006 dS.m⁻¹, resultados que indican que ninguno de los suelos estudiados tienen problemas de salinidad y que cualquier planta, aun las muy sensibles a la salinidad, puede desarrollarse normalmente en estos suelos.

Tabla 12

Análisis de la Conductividad Eléctrica (dS.m⁻¹)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capirona	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	0,006	0,003	0,04	0,003	0,002
20 – 40	0,002	0,002	0,005	0,004	0,001
40 – 60	0,003	-	-	0,004	-

Fuente: Elaboración propia.

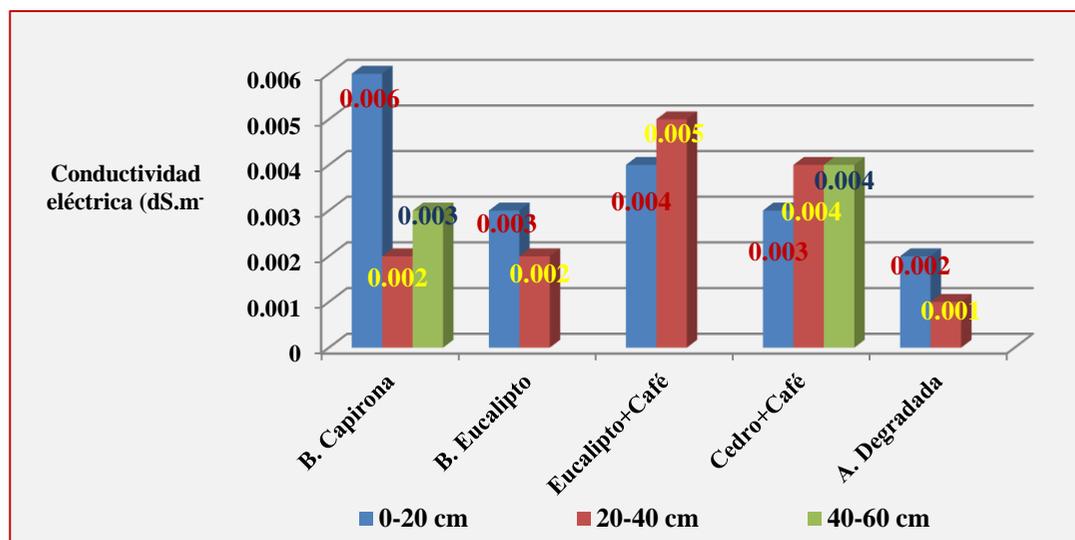


Figura 12: Resultados de la evaluación de la conductividad eléctrica

3.2.5. Carbonatos

En la Tabla 13 y la Figura 13 se encuentran los resultados del análisis de los carbonatos y las cantidades encontradas, que en la mayoría de perfiles es igual a 0, salvo los perfiles de los suelos con plantaciones de eucalipto asociado con café (BE+C) y “cedro de la india” asociado con “café” (BC+C) tienen un contenido bajo de carbonatos (10 a 11 g.kg⁻¹). Los resultados obtenidos indican que en los suelos estudiados no existe la presencia significativa de este componente, lo cual confirma que estos suelos están sometidos a un intenso lavaje de las bases cambiables, especialmente del calcio, elementos que están siendo trasladados a las capas más profundas del perfil, por las altas precipitaciones pluviales o trasladados fuera del sistema por efecto de la erosión laminar intensa que es muy notoria en las zonas en estudio. Los valores encontrados además indican que algunas plantas, especialmente las de tendencia básica tendrán un desarrollo irregular ya que habrá una excesiva presencia de elementos menores como el Al, Mn y el Fe que podrían afectar al desarrollo normal de las raíces al ser tóxicos cuando se encuentran en niveles altos de disponibilidad.

Tabla 13

Análisis de Carbonatos (g.kg⁻¹)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capirona	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	-	-	10	11	-
20 – 40	-	-	11	-	-
40 – 60	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

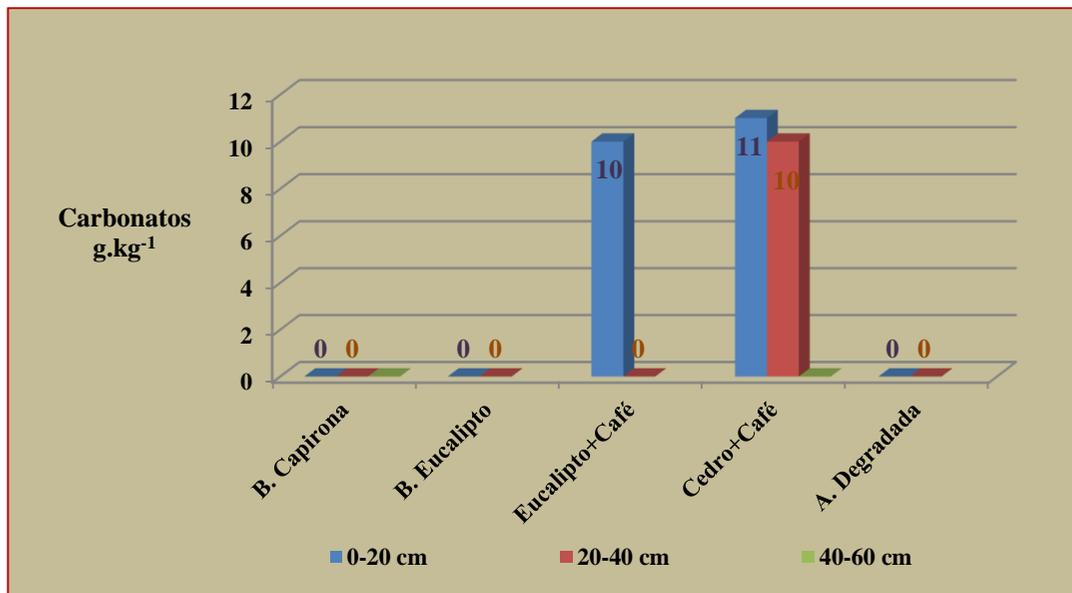


Figura 13: Resultados de la evaluación del contenido de carbonatos

3.2.6. Materia Orgánica

La Tabla 14 y el Figura 14, muestran el contenido de materia orgánica en las tres profundidades de los suelos en estudio. Estos resultados coinciden con los datos reportados por muchos investigadores, donde los mayores contenidos de materia orgánica se encuentran en los 20 primeros cm de los suelos, como consecuencia de la acumulación de los residuos orgánicos en la capa superficial, decreciendo notoriamente con relación a la profundidad como se observa en los perfiles del bosque de “capirona”, bosque de “eucalipto” y del área degradada. Sin embargo, en los perfiles donde se está desarrollando la agroforestería, como es el caso de la asociación de “eucalipto” más “café” y “cedro de la India” más “café”, la mayor concentración de materia orgánica se observan en las capas más profundas, probablemente debido a que la textura de estos suelos que es franco limosa y más gruesa que la textura franca que tienen los otros puntos de muestreo, haya

posibilitado un mayor lavaje de este componente como lo es la materia orgánica del suelo.

Estos resultados concuerdan con los reportados por Ortiz y Ortiz (1990) quienes indican que la materia orgánica del suelo tiende a disminuir con relación a la profundidad, especialmente cuando los suelos tienen un mayor contenido de arena como componente textural.

Asimismo, el bosque con plantaciones de “capirona” con 23,87 g.kg⁻¹, el bosque con plantaciones de “eucalipto” con 32,27 g.kg⁻¹ y el área degradada con 21,52 g.kg⁻¹ que sostiene algunas plantaciones de frutales y malezas, tienen mayor contenido de materia orgánica en la capa superficial (0-20 cm) con una notoria disminución hacia las capas más profundas (20-40 y 40-60 cm), contrariamente las asociaciones “eucalipto” con “café” con 19,26 g.kg⁻¹ y “cedro de la india” con “café” con 7,73 g.kg⁻¹ de materia orgánica presentan una menor concentración en la capa superficial de los suelos con una clara tendencia a incrementarse en los capas más inferiores (20-40 y 40-60 cm).

Tabla 14

Análisis de la Materia Orgánica (g.kg⁻¹)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capirona	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	23,87	32,27	19,16	7,73	21,52
20 – 40	20,17	12,1	24,2	14,12	3,36
40 – 60	7,73	-	-	22,19	-

Fuente: Elaboración propia.

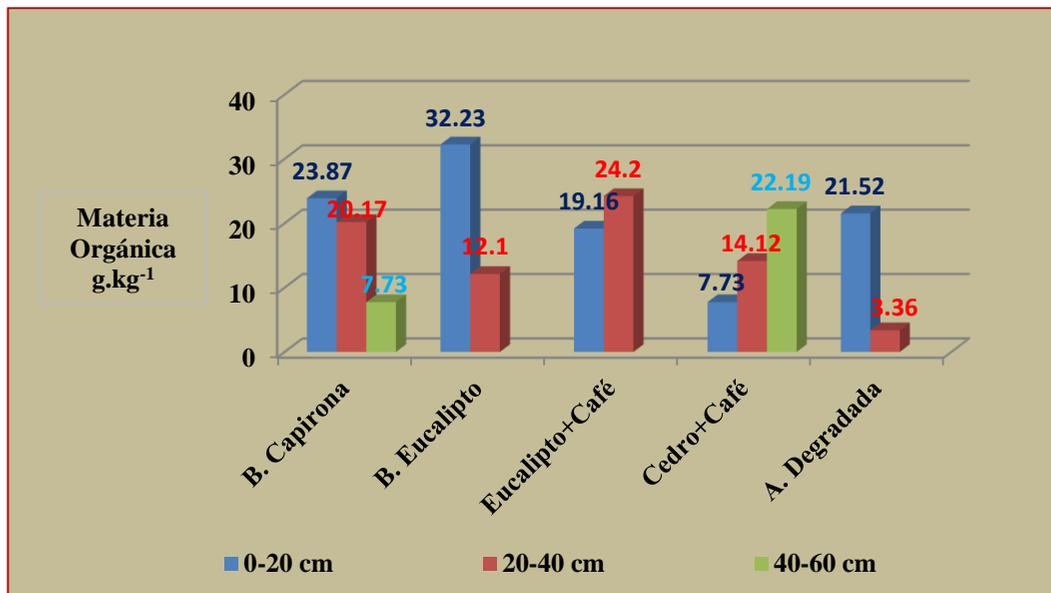


Figura 14: Resultados de la evaluación de la materia orgánica

3.2.7. Nitrógeno total

En cuanto a los resultados encontrados con relación a la distribución del nitrógeno en los perfiles estudiados, tal como se aprecia en la Tabla 15 y la Figura 15, se puede notar que esta distribución es muy similar al de la materia orgánica pero las diferencia encontradas son más afectadas por el clima, la vegetación y la topografía, puesto que la evaluación está hecha en base a distintas especies, es de esperar variaciones significativas tal como se puede apreciar en los resultados obtenidos.

El bosque de “capirona” con $0,924 \text{ g.kg}^{-1}$, el bosque de “eucalipto” con $0,812 \text{ g.kg}^{-1}$ y el área degradada con $0,644 \text{ g.kg}^{-1}$ de nitrógeno total, contienen una mayor cantidad de nitrógeno en la capa superficial, disminuyendo estos niveles con relación a la profundidad, lo contrario sucede con la combinación “eucalipto”+ “café” con $0,476 \text{ g.kg}^{-1}$ y “cedro de la india”+ “café” con $0,476 \text{ g.kg}^{-1}$ de nitrógeno total en la capa superficial (0-20 cm), muestran una tendencia de incrementar el contenido de nitrógeno con relación a la profundidad.

En este caso, también se ha encontrado que los niveles de nitrógeno, al igual que la materia orgánica, tienden a disminuir en su contenido con relación a la profundidad, concepto que es explicado por Ortiz y Ortiz (1990).

Tabla 15

Análisis del Nitrógeno Total ($g.kg^{-1}$)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capiroña	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	0,924	0,812	0,756	0,476	0,644
20 – 40	0,588	0,728	0,672	0,672	0,168
40 – 60	0,476	-	-	0,700	-

Fuente: Elaboración propia.

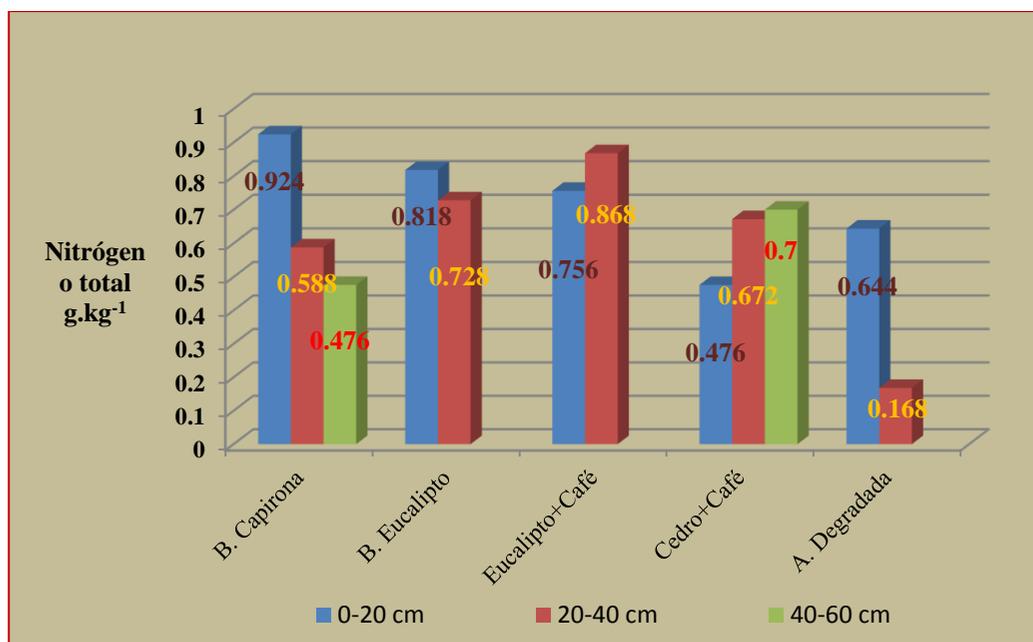


Figura 15: Resultados de la evaluación del nitrógeno total

3.2.8. Carbono Orgánico

La Tabla 16 y la Figura 16, muestran el contenido de carbono orgánico contenido en las tres profundidades de los suelos en estudio, los mismos que al igual de los contenidos de materia orgánica y de nitrógeno total, son muy variables.

Los contenidos más altos de carbono se han encontrado en la capa superficial (0-20 cm) en suelos de bosque de “capirona” (13,85 g.kg⁻¹), bosque de “eucalipto” (18,72 g.kg⁻¹) y área degradada (12,48 g.kg⁻¹), con la tendencia a menores contenidos en las capas más profundas (20-40 y 40-60 cm, respectivamente), mientras que en los suelos donde se asocian el cultivo de “eucalipto” más “café” (11,12 g.kg⁻¹) y “cedro” de la india más “café” (4,49 g.kg⁻¹), tienen un menor contenido de carbono en la capa superficial (0-20 cm) con un notorio incremento del carbono en las capas más profundas (20-40 y 40-60 cm, respectivamente. En resumen, de acuerdo a la Tabla 15, los suelos del bosque de “capirona” acumulan un total de 30,04 g.kg⁻¹, bosque de “eucalipto” 25,74 g.kg⁻¹, “eucalipto” + “café” 25,16 g.kg⁻¹, “cedro de la india”+ “café” 25,55 y área degradada 14,49 g.kg⁻¹ de carbono orgánico, respectivamente.

Tabla 16

Análisis del Carbono Orgánico (g.kg⁻¹)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capirona	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	13,85	18,72	11,12	4,49	12,48
20 – 40	11,70	7,02	14,04	8,19	1,95
40 – 60	4,49	-	-	12,87	-

Fuente: Elaboración propia.

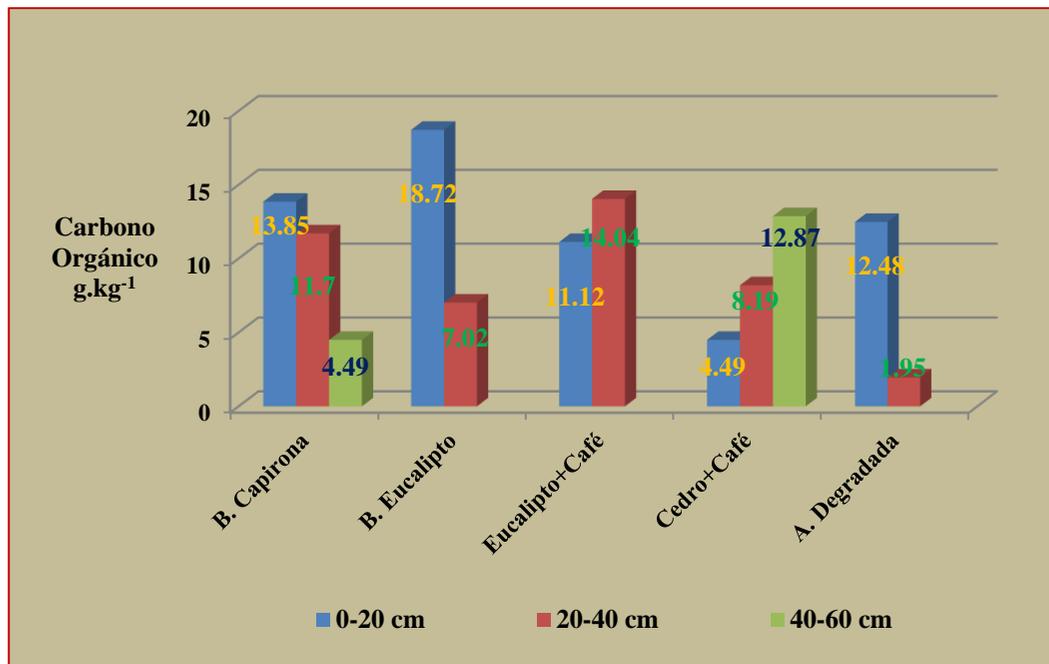


Figura 16: Resultados del contenido de carbono orgánico

3.2.9. Dióxido de Carbono Capturado

En la Tabla 17 y la Figura 17, se observan los resultados de la probable captura del dióxido de carbono (t.ha⁻¹) calculado en base al contenido de carbono orgánico contenido en los perfiles de los suelos estudiados. Es así el bosque de “capirona” que tiene un perfil está más profundo y constituido por plantas de un mediano desarrollo, es el que retiene mayor cantidad de CO₂ con 299,152 t.ha⁻¹, seguido por las asociaciones eucalipto-café con 267,31 (t.ha⁻¹) y “cedro de la india”+ “café” con 265,320 (t.ha⁻¹), luego está el bosque de “eucalipto” con 229,492 (t.ha⁻¹), ocupando el último lugar el área degradada con solo 139,951 (t.ha⁻¹).

Los resultados obtenidos muestran claramente la gran importancia que tiene la vegetación con relación a la captura de dióxido de carbono que es un importante factor en el incremento del efecto invernadero en nuestro planeta, aunque en este

estudio no se ha considerado la parte aérea y la biomasa producida por la vegetación considerada sino solo en lo que respecta a lo que por acción de las plantas manejadas por el hombre puede ser un elemento sumamente importante en la retención del exceso de carbono y por ende evitar el deterioro medioambiental.

Los resultados obtenidos tienen cierta similitud con lo reportado por Schroeder (1994), quién reporta que los bosques tropicales pueden almacenar entre 77 a 190 t.ha⁻¹ de dióxido de carbono ((21 a 50 t.ha⁻¹ de C), aunque otros autores como el caso de Fassbender, *et al.* (1991), reportan cantidades inferiores. Asimismo, Sánchez *et al.* (1999), agregan que la práctica de la agrosilvicultura tiene un potencial importante para la captura de carbono y por consiguiente del dióxido de carbono. Cuellar *et al.* (2015), Agregan que hay evidencias de una menor cantidad de carbono en el remanente de los bosques tropicales primarios que están siendo utilizados para la producción de cultivos, la mayor acumulación de carbono con 233,3 t.ha⁻¹ se encontró en el bosque primario que en comparación con lo reportado en la presente investigación tiene una similitud con el bosque de “capirona “con 299,152 t.ha⁻¹ de dióxido de carbono, a diferencia en el sistema de pasturas degradadas se encontró mayor cantidad de carbono retenido que en el área degradada, esto indica que la descomposición de la biomasa es más rápida en el sistema de pasturas que el área degradada debido a la presencia de humedad. García, *et al.* (2012), llegan a la conclusión que los boques de aguajal mixto de zonas bajas presentan la mayor cantidad de acumulación de carbono.

Los resultados del presente trabajo indican también las posibles direcciones políticas si se quiere incrementar el índice de captura del CO₂ atmosférico para ser acumulado en el suelo. Por un lado, se ha de propiciar una mayor extensión de cubierta vegetal en zonas degradadas por actividades antropogénicas donde la cubierta es escasa y por otro, hay que tener en cuenta que mayores aportes hídricos van a determinar un incremento en la biomasa forestal y por consiguiente mayor captura de CO₂: en este sentido, el clima húmedo y semicálido. Gran parte

de la Región de San Martín produce altos incrementos en la evapotranspiración y por consiguiente mayores requerimientos hídricos.

Tabla 17

Captura de dióxido de carbono ($t\cdot ha^{-1}$)

PROFUNDIDAD (cm)	CALICATA				
	1: Bosque Capirona	2: Bosque Eucalipto	3: Eucalipto + Café	4: Cedro India + Café	5: Área Degradada
0 – 20	138.726	208,853	115,902	51,742	120,915
20 – 40	115,935	20,639	151,489	84,160	19,036
40 – 60	44,491	-	-	129,418	-
Totales	299,152	229,492	267,391	265,320	139,951

Fuente: Elaboración propia.

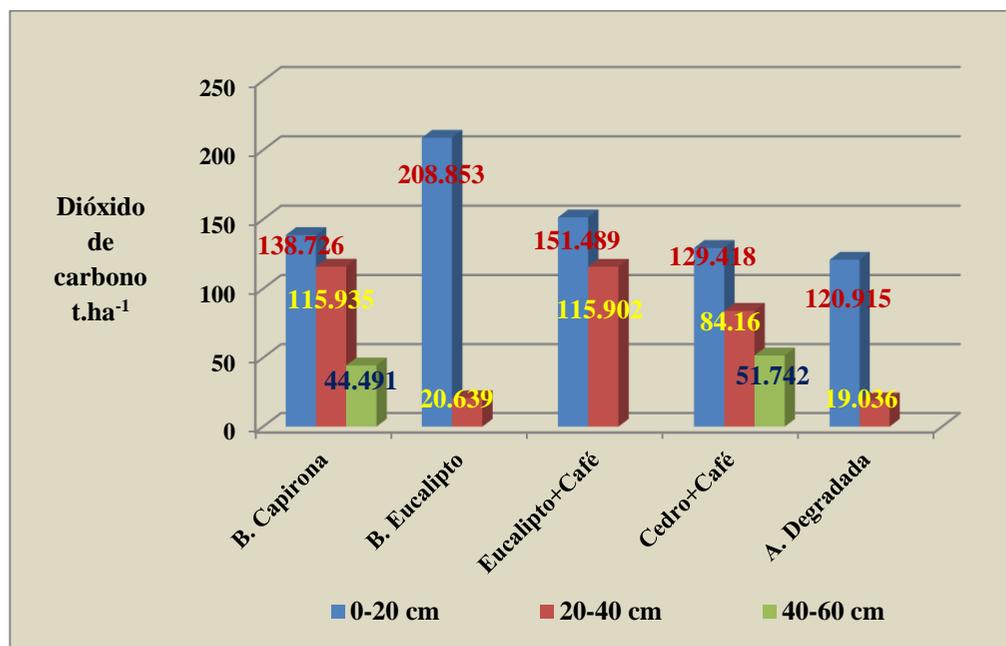


Figura 17: Resultados de la captura de dióxido de carbono

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

1. Los suelos estudiados en el presente trabajo de investigación, son suelos azonales (jóvenes) con escaso desarrollo pedogenético, con un perfil A(B)C, en el caso de los suelos con bosques de “capirona” y “eucaliptos”, y con un perfil AC en los suelos que soportan la práctica de agroforestería con la siembra combinada de “cedro de la india” más “café” y de “eucaliptos” más “café”, respectivamente.
2. Taxonómicamente los suelos son Inceptisols (Fluventic eutrodepts), de variable capacidad de uso mayor: (a) tierras de mediana aptitud forestal (F2es), como es el caso de los bosques de “capirona” (BC) y de “eucaliptos” (BE); (b) tierras de baja aptitud agrícola (A3sw), como es el caso de las tierras con agroforestería [cedro de la India + café (CI+C) y eucalipto + café (E+C), respectivamente] y el área degradada que soporta diversas plantaciones prácticamente abandonadas.
3. Estos suelos son moderadamente profundos, con presencia de grava en el horizonte superior, de topografía moderadamente empinada, con buen drenaje a excepción de los suelos del área degradada, con material madre de origen coluvio-aluvial, con moderada erosión superficial, exento de pedregosidad superficial y con relieve plano a ligeramente ondulado.

4. La textura es variable de franco limosa en las capas superficiales de los suelos con bosque de “capirona” (BC), agroforestería con “eucalipto” más “café” (E+C) y “cedro de la India” más “café” (CI+C), textura franca en el suelo con bosque de “eucalipto” y en las capas subyacentes de los anteriores suelos y textura arcillosa únicamente en los suelos del área degradada (AD).
5. La reacción de estos suelos también es variable, encontrándose suelos de pH neutro, como es el caso de los suelos con bosque de “capirona”, suelos de pH moderadamente ácidos en el bosque de “eucaliptos” (BE) y en el área degradada (AD) y suelos pH moderadamente básicos en las áreas con agroforestería con “eucaliptos” más café (E+C) y de “cedro de la india” más “café” (CI+C), indicando que en los suelos de bosque y del área degradada se ha producido un mayor lavaje de bases con respecto a los suelos donde se practica la agroforestería.
6. La densidad aparente, que sirve para calcular el peso de los suelos, tienen valores muy variables, es así que las menores densidades oscilan entre 1,35 a 1,37 g.cm⁻³ como se ha encontrado en los suelos con bosque de “capirona” (BC) y en el área degradada (AD), mientras que los valores son más altos entre 1,37 a 1,52 g.cm⁻³ característica de los suelos con bosques de “eucaliptos” (BE) y suelos con agroforestería de “eucaliptos” más “café” (E+C) y de “cedro de la india” más “café” (CI+C).
7. La conductividad eléctrica de los suelos estudiados, tienen valores muy bajos que oscilan entre 0,003 a 0,006 dS.m⁻¹, indicando que en ninguno de estos suelos existe problema de salinidad para los cultivos, incluyendo aquellos muy sensibles. Algo similar ocurre con el contenido de carbonatos, encontrándose en niveles medios (de 10 a 11 g.kg⁻¹) solo en los dos suelos con agroforestería, dándose a entender que el proceso de lixiviación es menor en estos suelos.
8. En cuanto al contenido de materia orgánica de los suelos estudiados también es muy variables: (a) con contenido muy bajo (< 20 g.kg⁻¹) en la capa superficial de los dos

suelos con agroforestería [“eucaliptos” más café (E+C) y de “cedro de la india” más “café” (CI+C)] y (b) contenido medio (20 a 40 g.kg⁻¹) en los suelos restantes: o sea en el bosque con “capirona”, bosque de “eucalipto” y área degradada, esta última con un excesivo porcentaje de humedad.

9. El contenido de nitrógeno total está en cantidades muy bajas y estrechamente relacionados con el contenido de materia orgánica, la textura y la densidad aparente de los suelos, pero en las tres profundidades estudiadas (0-20,20-40,40-60 cm) está en niveles bajos (< 1,0 g.kg⁻¹), incluyendo los suelos con agroforestería.
10. En cuanto al contenido de carbono orgánico en la capa superficial de los suelos estudiados, se ha encontrado que en el bosque de “capirona” (BC), bosque de “eucalipto” y el área degradada (AD), el contenido es medio (11,6 a 23,2 g.kg⁻¹); mientras que en los suelos con agroforestería [(E+C y CI+C)], el contenido de carbono orgánico es bajo o pobre (< 11,6), lo cual tendrá una influencia notoria en el contenido de CO₂ en los suelos estudiados. En las dos capas más profundas restantes el contenido de carbono es también variable, influenciando en la determinación del dióxido de carbono capturado por los suelos.
11. Al evaluarse la cantidad de dióxido de carbono, se ha determinado que el bosque de “capirona” con 299,152 t.ha⁻¹ y los suelos con agroforestería con “eucalipto” + “café” con 267,391 t.ha⁻¹ y con “cedro de la india” + “café” con 265,320 t.ha⁻¹, son los que mayor cantidad de CO₂ han fijado en el suelo. Luego están el bosque de eucalipto con 229,492 t.ha⁻¹ y el área degradada con solo 139,951 t.ha⁻¹ de CO₂.
12. Finalmente, las cantidades de CO₂ que están retenidos en el suelo y que provienen únicamente de la biomasa producida por los sistemas de uso del suelo, están indicando claramente que el tipo de vegetación y el sistema de uso del suelo son sumamente importantes en la captura de CO₂, sobre todo cuando es comparado con un área

degradada, explicando la importancia que tiene la vegetación en la captura de dióxido de carbono que es almacenado en el suelo.

CAPÍTULO V

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda desarrollar tecnologías agroforestales ecológicamente sostenibles para recuperar las áreas deforestadas que están en proceso de degradación en la Amazonía Peruana con la utilización de especies forestales nativas y exóticas adaptadas, solas o combinadas mediante la agroforestería, ya que estas especies a la vez de almacenar cantidades adicionales de carbono orgánico, pueden proteger al suelo y aumentar la rentabilidad de la tierra provocando un mayor bienestar en las poblaciones de la selva peruana.

2. Dentro de esas especies forestales que además de mejorar el clima, proteger al suelo y contrarrestan el efecto invernadero, por ser plantas de rápido desarrollo y productoras de una abundante biomasa de fácil descomposición e incorporación al suelo, se recomienda a la “capirona” como árbol para la reforestación y al “eucalipto” o “cedro de la india” combinados con “café” u otras especies de frutales, por ser especies que han demostrado una mayor eficiencia en la captura CO₂ almacenado en el suelo, y por ser especies que están adaptadas a las condiciones edáficas y climatológicas de la zona en estudio.

3. Se debe tener en cuenta que el carbono orgánico que se acumula gradualmente en el suelo a través de la actividad de los microorganismos del suelo, en los complejos orgánicos cada vez más estables. Sin embargo, el laboreo del suelo, el uso de agrotóxicos y la implantación de especies exóticas de rápido crecimiento, destruyen

gran parte de esta reserva y cuando los árboles son talados indiscriminadamente para la comercialización, este carbono es liberado hacia la atmosfera formando el dióxido de carbono, contribuyendo al efecto invernadero.

4. El manejo forestal eficiente y el manejo de los ecosistemas pueden disminuir la acelerada deforestación y por consiguiente amenguar el problema del calentamiento global. Es sí que el control de las emisiones de gases, el manejo del carbono, junto con otras medidas en los ecosistemas tropicales, pueden ser actores en el plan global para evitar los efectos del calentamiento global; sin embargo, es difícil cuantificar su contribución.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armas, A., Borner, J., Tito, M., Díaz, L., Tapia, S., Wunder, S., Reymond, L. y Nascimento, N. (2009). *Pagos por Servicios Ambientales para la conservación de bosques en la Amazonía peruana: Un análisis de viabilidad*. SERNANP. Lima, Perú. 92 p.
- Autoridad Regional Ambiental. 2015a. *Zonas de vida*. Gobierno Regional de San Martín. San Martín: (ARA).
- Autoridad Regional Ambiental. 2015b. *Formaciones Geológicas*. Oficina de Gestión Territorial. Gobierno Regional de San Martín. San Martín: (ARA).
- Azabache, A. (2003). *Fertilidad de suelos, para una Agricultura Sustentable*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú.
- Azabache, A. (2010). *Contaminación de Suelos*. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Continental. Huancayo, Perú.
- Brady, N. (1990). *The Nature and Properties of Soils*. Macmillan Publishing Company. New York, USA.

Brady, N., & Weil, R. (2004). *Elements of the Nature and Properties of Soils*, 2/E. Ed. Pearson Prentice Hall, N.J., USA.

Briceño, J. y Pacheco, R. (2002). *Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas*. Edit. Universidad de Costa Rica. San José, costa Rica.

Bullón J., Rodríguez H. y Munive, E. 1990. *Edafología*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Agronomía. Huancayo, Perú.

Buendia, B, (2009). *Influencia de cuatro sistemas forestales y un agroecosistema degradado sobre la fertilidad de suelos en selva alta – Distritos de Chontabamba y Oxapampa – Región Pasco*. Tesis M. Sc. Escuela de Postgrado UNDAC. Pasco, Perú.

Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2000). *Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una perspectiva desde las ciencias de la Tierra*. Universidad Autónoma de México. México.

Carvajal, A. (2008). *Relacion del carbono y nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en Alcalá.España*.

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (1998). *Sistemas Agroforestales*. Turrialba, Costa Rica: (CATIE).

Chanoy, D. (1992). *Sustainable agriculture and education program*. University of California. California, USA.

Che Piu, H. y Menton, M. (2013). *Contexto de REDD+ en Perú: Motores, actores e instituciones*. Documentos Ocasionales 90. Bogor, Indonesia.

Comité Regional Ambiental. (2005). *Estrategia Regional de la Diversidad Biológica de Amazonas (ERDBA)*. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana; Gobierno Regional de Amazonas: (CAR).

Cuellar, J., Salazar, E. y Dietz, J. (2015). *Patrón de cambios del almacenado en el ecosistema debido al cambio de uso del bosque tropical en la Cuenca de Aguaytía, Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA. Lima, Perú. 133p.

Dourojeanni, Marc. (2010). *Amazonia peruana en 2021*. Lima.

Fondo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1993). *Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries*. Forestry Paper 112. Roma, Italia: (FAO).

Fondo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1998). *Topsoil Characterization for Sustainable Land Management*. Land and Water Development Division. Rome, Italy: (FAO).

Fondo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2005). *Términos y definiciones. Evaluación de los recursos forestales*. Roma: (FAO).

Fassbender, H., Beer, J., Henveldop, J., Imbach, A., Enriquez, G. & Bonnemann, A. (1991). *Ten year balance of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE*. Costa Rica Forest Ecology and Management. San José, costa Rica.

Garcia, D., Honorio, E., Del Castillo, D. (2012). *Determinación del stock de carbono en aguajales de la cuenca del río aguaytía*. PROBOSQUES.Ucayali.

Greenland, D.J. 1995. *Land use and soil carbon in different agroecological zones*. In: *Soils and global Change*. Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds). CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p 1-24

- Gregorich, E., Greer, K., Anderson, D. & Liang, B. (1998). *Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects*. Soil & Tillage Research 47: 291-302.
- Hart, R. (1985). *Conceptos Básicos sobre Agroecosistemas*. (1980). CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S. & Nelson, W. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to nutrient Management*. Seventh Edition. Pearson/Prentice Hall. New Jersey, USA. 528 p.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F. y Rojas, J. (2007). *Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua*. Revista Agroforestería N° 45.
- Instituto de la Potasa y el Fósforo. (1997). *Manual Internacional de Fertilidad de Suelos*. 1ra. Edición. Quito, Ecuador: (INPOFOS).
- Intergovernmental Panel on Climate Change.(2000). *Land use, land-use change, and forestry special report*. Cambridge University Press 377: IPCC.
- Jordán, A. (2010). *Edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
- Lal, R. (1995). *Soil erosion and land degradation: the global risks*. Adv. In Soil Sci.11:129-172. Sustainable Management of Soils Resources in the Humid Tropics. The United Nations University. Tokyo, Japan.
- Lal, R. (1997). *Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment*. Soil Tillage Res 43:81–107.
- Lal, R. (1998). *Physical Management of Soils of the Tropics: Priorities for the 21st Century*. Soil Science 165. Madison, USA.

- Lal, R. (1999). *Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use*. In: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. World Soil Resources Report 86. FAO, Rome. p 45-52.
- Lachat Instruments. (Sin fecha). *Total Kjeldahl Nitrogen in Soil/Plant*. (Quik Chemical Method. Milwaukee. Wisconsin, USA.
- Lampeyre, T., Alegre, J. y Arevalo, L. (2004). *Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín*. San Martín, Perú. 3(1.2).
- Marcano, J. (2007). *Recursos Naturales*. Recuperado de: <http://www.jmarcano.com/bosques/threat/deforsta.html>.
- Mendieta, M., y Rocha, L. (2007). *Sistemas Agroforestales*. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. 115 pp.
- Mengel, E. & Kirkby, A. (1987). *Principle of Plant Nutrition*. 4ª Edición (1987). International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- Mehlich, A. (1984). *Photometric Determination of Humic Matter in Soils a proposed method*. Communication in Soil Science and Plant Annalsys 12 (12):1414-1422.
- Ministerio de Agricultura. (2012). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa del bosque de la Comunidad Nativa Eseésja de Infierno*. Madre de Dios: (MINAG).
- Ministerio del Ambiente. (2010). *Apoyo a la implementación de REDD+ en el Perú*. Documento de proyecto. Lima: (MINAM).

- Ministerio del Ambiente. (2012). *Memoria Técnica de la Cuantificación de los cambios de la Cobertura de Bosque a No Bosque por Deforestación en el ámbito de la Amazonía Peruana*. Periodo 2009-2010-2011. Lima: (MINAM).
- Ministerio del Ambiente. (2013). *Política Nacional Forestal y de Fauna Silvestre*. Perú:(MINAM).
- Ministerio del Ambiente. (2013): *Política Nacional Forestal y de Fauna Silvestre*. Lima: (MINAM).
- Organización de las Naciones Unidas. (2010). *Apoyo a la implementación de REDD+ en el Perú*. Convenio Ministerio del Ambiente. Documento de proyecto. Lima.
- Ortíz, B. y Ortiz, C. (1990). *Edafología, Suelos*. Editorial de la Universidad Autónoma de Chapingo. 7ma. Edición en Español. Chapingo, México. 343 pp: (ONU).
- Palacin, A. (2011). *Movimiento del carbono, nitrógeno y humus en el sistema edáfico con plantaciones forestales, bosque secundario y área de regeneración natural en el distrito de Chontabamba – Oxapampa*. Tesis M. Sc., Escuela Daniel Alcides Carrión”. Cerro de Pasco, Perú. 130 pp.
- Palomeque, E. (2009). *Sistemas Agroforestales*. Gobierno del Estado de Chiapas. Chiapas, México. 29 pp.
- Plaster, E. J. 2 005. *La Ciencia del Suelo y su Manejo*. Thompson Editores. 2da. Reimpresión. Madrid, España.
- Porta, C., López, R. y Roquero, L. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.917 pp.

Pizzumo, M. (2003). *Estimación preliminar del stock de carbono en diferentes tipos de bosques en el Parque Nacional Caazapa*. Tesis Ingeniería Forestal. México D.F, México.

Programa Especial Alto Mayo (2015). *Resultados de análisis de suelos*. Laboratorio de Suelos. Dirección de Desarrollo Agropecuaria del Gobierno Regional de San Martín. Nueva Cajamarca: (PEAM).

Salgado, S., Núñez, R., Palma, D. y Lagúnez, L. (2010). *Manejo de Fertilizantes Químicos y Orgánicos*. Mundi-Prensa México S. A. Primera edición. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.

Sagan, E.(2 001). *Desnitrificación*. Disponible en:
http://www.sagangea.org/hojared_biodiversidad/paginas/hoja9.html.

Sánchez, P., Buresh, R. & Leakey, R. (1999). *Trees, soils and food security*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B 353: 949-961. London, England.

Scherr, S. (2006). *Degradación de Suelos, Una Visión al 2 020*. Documento de Trabajo N° 27. Departamento de Economía Agrícola y de Recursos Naturales, Universidad de Maryland, College Park. Maryland, USA.

Schindler, D.W. 1999. *The mysterious missing sink*. Nature 398: 105-107.

Schoeneberger, P., Wysocki, D., Beham, E. & Broderson, W. (1998). *Field Book for Describing and Sampling soils*. Natural Resources Conservation Service. Nebraska, USA.

- Schroeder, P. (1994). *Carbon storage benefits of agroforestry systems*. *Agroforestry Systems* 27: 89-97.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2014). *Datos Meteorológicos. Estación Meteorológica Naranjillo*. San Martín: (SENAMHI).
- Sys, C. & Verheye, M. (1993). *Land Evaluation*. International Training Centre for Post-graduate Soil Scientists. State University of Ghent. Ghent, Belgium.
- Tan, Z., Lal, R. (2005). Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio. *Agriculture*.
- United States Department of Agriculture. (1992). *Árboles en acción, qué es a agroforestería?*. Centro Nacional de Agroforestería. Nevada: USDA.
- Asociación Española de la Industria Eléctrica, (2005). *Forestación y Reforestación. Sumideros de Carbono. En: Metodologías para la Implementación de los Mecanismos flexibles de Kioto – Mecanismo de Desarrollo Limpio en Latinoamérica*: (UNESA).
- Woomer, P., Palm, C., Qureshi, J. & Kotto-Same, J. (1998). *Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture*. In: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 153-173.

TERMINOLOGÍA

- **Agroforestería:** Agroforestería significa mezclar intencionalmente árboles y arbustos con cultivos o sistemas de producción animal para obtener beneficios ambientales, económicos y sociales de forma ecológicamente sustentable (USDA, 2013).
- **Cambio climático:** Es un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (ONU, 1992).
- **Degradación:** La degradación del suelo es un proceso que afecta negativamente la biosfera interna del suelo para soportar vida en un ecosistema, ocurre cuando el suelo pierde importantes propiedades como consecuencia de una inadecuada utilización (Salgado *et al.*, 2010).
- **Efecto invernadero:** Es un fenómeno por el cual la atmósfera de la Tierra se calienta por la acción de ciertos gases y para poder profundizar sus efectos es necesario entender y conocer los factores que están incidiendo en los cambios atmosféricos (Caballero *et al.*, 2000).
- **Gases de efecto invernadero:** Son aquellos componentes de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y re-emiten la radiación infrarroja aumentando la temperatura del medio ambiente (Naciones Unidas, 1992).
- **Horizonte:** Es una capa aproximadamente paralela a la superficie del suelo y diferenciable de las capas adyacentes por un grupo de propiedades que usualmente pueden ser observadas o medidas en el campo (Bullón *et al.*, 1990).

- ***In situ***: Es una expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar”, y que es generalmente utilizada para designar un fenómeno observado en el lugar o una manipulación realizada en el mismo campo como es el caso de la descripción morfológica del suelo (Salgado, *et al.* 2010).
- **Perfil**: Es una sección vertical a través del suelo. Comúnmente es concebido como un plano en ángulo recto a la superficie. En la práctica, una descripción de un perfil de suelo incluye algunas propiedades del suelo que pueden ser determinados sólo por inspección de volúmenes de suelo (Havlin *et al.*, 2005).
- **Sostenibilidad**: Es la administración exitosa de los recursos para que la agricultura satisfaga las cambiantes necesidades humanas, sin dejar de mantener y mejorar la calidad del medio ambiente y conservar los recursos naturales para beneficio de las futuras generaciones (Salgado *et al.* 2010).
- **Suelo**: Es la parte superficial de la corteza terrestre, donde se desarrollan las raíces de las plantas. No es un medio inerte y estable, sino que es el resultado de la acción del clima y de los seres vivos sobre la superficie terrestre a lo largo del tiempo, es un medio muy complejo y en permanente evolución (Azabache, 2003).
- **Dióxido de Carbono (CO₂)**: Gas incoloro, inodoro e incombustible que se encuentra en baja concentración en el aire que respiramos (en torno a un 0,03% en volumen). El dióxido de carbono se genera cuando se quema cualquier sustancia que contiene carbono. También es un producto de la respiración y de la fermentación. Las plantas absorben dióxido de carbono durante la fotosíntesis (Schroeder, 1994).
- **Ecosistema**: El complejo sistema formado por las comunidades de plantas, animales, hongos y microorganismos así como por el medioambiente inerte que les rodea y sus interacciones como unidad ecológica. Los ecosistemas no tienen límites fijos, de modo que sus parámetros se establecen en función de la cuestión científica,

política o de gestión que se esté examinando. En función del objetivo del análisis, puede considerarse como ecosistema un único lago, una cuenca, o una región entera (FAO, 1992).

- **Gas de efecto invernadero:** Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes, causando el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), y ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, y otros gases de efecto invernadero, como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC), y los perfluorocarbonos (PFC) (ONU, 1992).

- **Cambio climático:** Fluctuaciones a largo plazo de la temperatura, las precipitaciones, los vientos y todas los demás componentes del clima en la Tierra. También es definido como "un cambio en el clima, atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables (FAO, 1992).

- **Captura de carbono:** Extracción y almacenamiento de carbono de la atmósfera en sumideros de carbono (como los océanos, los bosques o la tierra) a través de un proceso físico o biológico como la fotosíntesis. Los seres humanos han intentado aumentar el secuestro de carbono plantando nuevos bosque.

APÉNDICES

Apéndice 1. Parámetros para la interpretación de las características generales y de los resultados de los análisis de suelos (Schoeneberger et al., 1998)

1. Forma y grado de pendiente

Clases	Pendiente (%)	Definición
1	0 – 4	Llano
2	4,1 – 8	Ligeramente inclinado
3	8,1 – 12	Moderadamente inclinado
4	12,1 – 16	Inclinado
5	> 16	Muy inclinado

2. Profundidad

Clase	Profundidad (cm)	Definición
MS	0 – 15	Muy superficial
S	15 – 30	Superficial
R	30 – 60	Regular
M	60 – 90	Mediana
P	90 – 150	Profunda
MP	> 150	Muy profunda

3. Humedad

Código	Clase de Humedad	Criterio
D	Seco	15 bares de tensión, cerca del punto de marchitamiento.
M	Húmedo	1/3 a 15 bares de tensión (capacidad de campo a punto de marchitez).
W	Mojado	0 a 1/3 bares de tensión (capacidad de campo o más saturado).
WN	Mojado no saturado	Películas de agua visibles pero no está presente agua libre.
WS	Saturado	El agua libre es fácilmente visible.

4. Tipos de texturas del suelo en base a la clase textural

Clase	Calificación	Clase textural
F1	Muy fina	Mayor de 60% de arcilla.
F2	Fina	Franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco arcillo limosa, arcillo arenosa, arcillo limosa, arcilla.
M	Media	Franca, franco limosa, limosa.
G1	Moderadamente gruesa	Franco arenosa.
G2	Gruesa	Arena franca, arena.

5. Estructura del suelo (por su forma)

Tipos	Código	Criterios de definición
Granular	GR	Poliedros pequeño con caras curvadas o muy irregulares.
Bloques angulares	ABK	Poliedros con caras que se interceptan en ángulos filudos (planos).
Bloques subangulares	SBK	Poliedros con caras redondeadas y planas, ausencia de ángulos pronunciados.
Laminar	PL	Unidades planas o tubulares.
Prismática	PR	Unidades elongadas verticalmente y planas.
Columnar	COL	Unidades alargadas verticalmente y redondeadas

6. Fragmentos superficiales

Clase	%	Definición
0	0 – 1	Exento de gravas y piedras
1	2 – 10	Ligera pedregosidad o gravosidad
2	11 – 20	Media pedregosidad o gravosidad
3	21 – 40	Intensa pedregosidad o gravosidad
4	41 – 80	Muy intensa pedregosidad o gravosidad
5	> 80	Extremada gravosidad o pedregosidad

7. Drenaje

Código	Definición
VP	Muy pobremente drenado
PD	Pobremente drenado
SP	Ligeramente bien drenado
MW	Moderadamente bien drenado
WD	Bien drenado
SE	Ligero excesivamente drenado
ED	Excesivamente drenado

8. Consistencia (en húmedo)

Código	Definición
L	Suelta
VFR	Muy friable
FR	Friable
FI	Firme
VFI	Muy firme
EF	Extremadamente firme

9. Permeabilidad

Código	Definición
IM	Impermeable
VS	Muy lenta
S	Lenta
MS	Moderadamente lenta
M	Moderada
MR	Moderadamente rápida
RA	Rápida
VR	Muy rápida

10. Reacción del suelo

Valor del pH	Definición
< de 3,5	Ultra ácido
3,5 a 4,4	Extremadamente ácido
4,5 a 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 a 5,5	Fuertemente ácido
5,6 a 6,0	Moderadamente ácido
6,1 a 6,5	Ligeramente ácido
6,6 a 7,3	Neutro
7,4 a 7,8	Ligeramente básico
7,9 a 8,4	Moderadamente básico
8,5 a 9,0	Fuertemente básico
> de 9,0	Muy fuertemente básico

11. Escorrentía superficial

Código	Definición
N	Insignificante (negligible)
VL	Muy lenta
L	Lenta
M	Media
H	Alta
VH	Muy alta

12. Erosión hídrica

Clase	Calificación	Definición
A	Nula	Sin erosión.
E	Moderada	Ligera erosión, canalículos y surcos superficiales.
I	Severa	Abundantes canalículos, surcos profundos y cárcavas pequeñas.
0	Muy severa	Cárcavas abundantes y profundas.

13. Salinidad

Clase	C.E. (dS.m ⁻¹)	PSI	Definición
0	< de 2	0 – 4	No salino
1	2 a < 4	4 – 8	Muy ligeramente salino
2	4 a < 8	8 – 12	Ligeramente salino
3	8 a < 16	12 – 15	Moderadamente salino
4	> a 16	> 15	Fuertemente salino

14. Riesgo de anegamiento o inundación

Clase	Definición
0	Sin riesgo de inundación.
1	Ligera inundación y por período corto.
2	Moderada inundación de gran profundidad.
3	Severa inundación, frecuente por períodos largos, no cultivos.
4	Extrema inundación de duración casi permanente.

15. Límites

Clases	Código	Criterio
Muy abrupto	V	< 0,5 cm.
Abrupto	A	0,5 – 2,0 cm.
Claro	C	2,0 – 5,0 cm.
Gradual	G	5,0 – 15 cm.
Difuso	D	> 6 = 15 cm.

16. Calcáreo total

Clases	g.kg ⁻¹	Criterio
1	Menor de 10	Bajo
2	10 a 50	Medio
3	50 a 150	Alto (Precipita al fósforo)
4	Mayor de 150	Muy alto (alta toxicidad)

17. Materia orgánica

Clases	g.kg ⁻¹	Criterio
1	Menor de 20,0	Bajo
2	20,0 a 40,0	Medio
3	Mayor de 40,0	Alto

18. Nitrógeno total

Clases	g.kg ⁻¹	Criterio
1	0,0 a 1,0	Bajo
2	1,0 a 2,0	Medio
3	Mayor de 2,0	Alto

19. Fósforo disponible

Clases	mg.kg ⁻¹	Criterio
1	0,0 a 6,0	Bajo
2	6,0 a 14,0	Medio
3	Mayor de 14,0	Alto

20. Potasio disponible

Clases	mg.kg ⁻¹	Criterio
1	Menor de 75,0	Bajo
2	75,0 a 125,0	Medio
3	125,0 a 250,0	Alto
4	Mayor de 250	Muy alto

21. Capacidad de intercambio catiónico

Clases	cmol.kg ⁻¹	Criterio
1	Menor de 4,0	Muy Baja
2	4,0 a 8,0	Moderadamente baja
3	8,0 a 12,0	Baja
4	12,0 a 20,0	Moderadamente alta
5	Mayor de 20,0	Alta

Apéndice 2. Hoja de descripción de perfiles

DESCRIPCIÓN MOFOLOLÓGICA DEL PERFIL DEL SUELO

a) Características generales

N° Calicata	Serie
Asociación	Clasificación técnica
Clasificación natural	Clasificación Taxonómica
Localidad	Precipitación Temperatura.....
Material madre	Vegetación o cultivo
Fisiografía
Relieve	Permeabilidad
Altitud	Drenaje
Pendiente	Escorrentía superficial
Erosión	Napa freática
Distribución de raíces	Humedad
Salinidad	Porosidad
Pedregosidad superficial	Alcalinidad

b) Descripción del perfil

Hor.	Prof. (cm)	Color		Text.	Modif. text.	Estruc.	Consisten.			pH	CO ₃	Limite
		Sec.	Hum.				S	H	M			

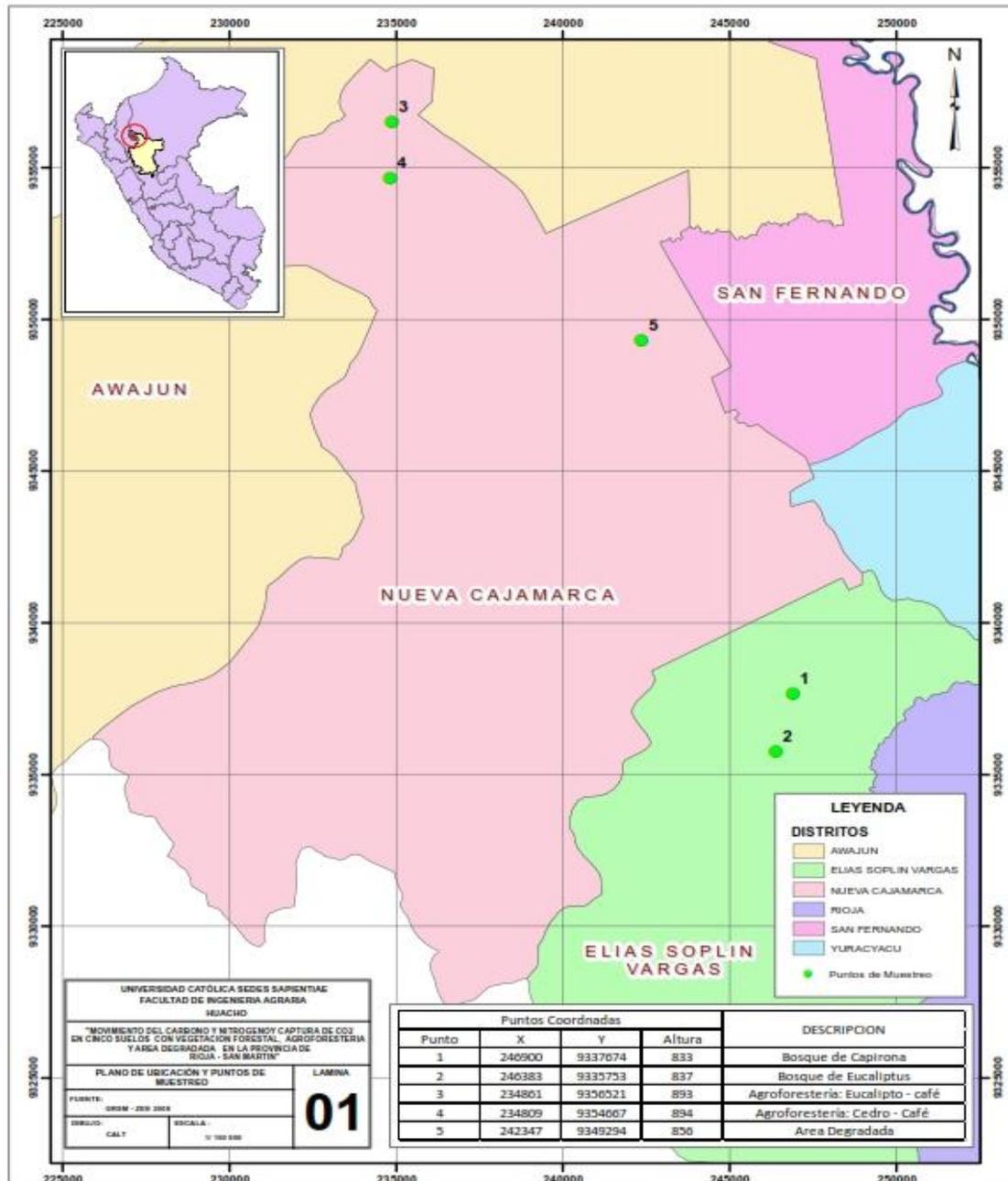
Observaciones:

.....

Fecha:

Fotografía:

Apéndice 3. Plano de ubicación y puntos de muestreo



Apéndice 4. Fichas de descripción de los perfiles de suelos en el campo

DESCRIPCIÓN MOFOLOLÓGICA DEL PERFIL DEL SUELO

a) Características generales

N° Calicata 01 Serie

Asociación Clasificación técnica F

Clasificación natural Clasificación Taxonómica

Localidad Segunda Jerusalen Precipitación Temperatura.....

Material madre Vegetación o cultivo Capirena, Pasto

Fisiografía Permeabilidad Muy Lenta

Relieve ondulado Drenaje Muy Pobremente drenado

Altitud Escorrentía superficial Lenta

Pendiente Ligeramente inclinado Napa freática 60%

Erosión Moderada Humedad el agua libre es fácilmente visible

Distribución de raíces Regular Porosidad

Salinidad 0 Alcalinidad

Pedregosidad superficial exento de gravas y piedras.

b) Descripción del perfil

Hor.	Prof. (cm)	Color		Text.	Modif. text.	Estruc.	Consisten.			pH	CO ₂	Limite
		Sec.	Hum.				S	(H)	M			
P1	0-20	10YR	3/1	Fco Arc	Nódulos	ABK	FR			7.2	-	Abierto
P2	20-40	2.5YR	3/2	Fco Arc	Nódulos	SBK	FR			7.0	-	Difuso
P3	40-60	10YR	4/1	Fco Arc	Nódulos	ABK	FR			7.2	-	Difuso

Observaciones:

P1: Presencia de nódulos blanquecinos

P2: Presencia de moteadura de óxido de Hierro

P3: Presencia de moteadura de óxido de Hierro.

Fecha:

Fotografía:

DESCRIPCIÓN MOFOLOLÓGICA DEL PERFIL DEL SUELO

a) Características generales

N° Calicata 02 Serie

Asociación Clasificación técnica F

Clasificación natural Clasificación Taxonómica

Localidad Segunda Jerusalem Precipitación Temperatura

Material madre Vegetación o cultivo Eucalipto, Maiz

Fisiografía Permeabilidad Lenta

Relieve ondulado Drenaje Pobremente drenado

Altitud Escorrentía superficial Lenta

Pendiente ligeramente pendiente Napa freática Regular

Erosión Moderado Humedad Mojado

Distribución de raíces superficial Porosidad

Salinidad no salino Alcalinidad

Pedregosidad superficial ligera pedregosidad

b) Descripción del perfil

Hor.	Prof. (cm)	Color		Text.	Modif. text.	Estruc.	Consisten.			pH	CO ₃	Limite
		Sec.	Hum.				S	(H)	M			
P1	0-20	10R	2.5/1	Fria Arc	Granita	GR	FR		5.9		Difuso	
P2	20-40	10YR	3/2	Fria Arc	Gravilla	SBK	FR		5.8		Difuso	
P3	40-60	—	—									

Observaciones:

P3: no se tomo muestras por que es el material madre.

Fecha:

Fotografía:

DESCRIPCIÓN MOFOLOGICA DEL PERFIL DEL SUELO

a) Características generales

N° Calicata 03 Serie

Asociación Clasificación técnica F

Clasificación natural Clasificación Taxonómica

Localidad Naranjillo - Nueva Cajamarca Precipitación Temperatura

Material madre Vegetación o cultivo Café, Eucalypto, Tostellano y Salino

Fisiografía Permeabilidad Moderada

Relieve Ondulado Drenaje Moderadamente drenado

Altitud Escorrentía superficial Lenta

Pendiente Ligeramente inclinado Napa freática mediana

Erosión mediana Humedad mediana no saturado

Distribución de raíces Regular Porosidad

Salinidad no salino Alcalinidad no alcalino

Pedregosidad superficial ligera pedregosidad

b) Descripción del perfil

Hor.	Prof. (cm)	Color		Text.	Modif. text.	Estruc.	Consisten.			pH	CO ₂	Limite
		Sec.	Hum.				S	(H)	M			
P1	0-20	2.5YR	2.5/2	Fino Arc	Grava	BSA	Firme	8.0	1.0	Abrupto		
P2	20-40	2.5YR	4/2	Fino Arc	Grava	BSA	Firme	7.9	-	Abrupto		
P3	40-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Observaciones:

P1: Rojo muy oscuro

P2: Rojo debil.

las plantaciones de café tienen un promedio de 5 años de edad.

Fecha:

Fotografía:

DESCRIPCIÓN MOFOLOLÓGICA DEL PERFIL DEL SUELO

a) Características generales

N° Calicata 04 Serie

Asociación Clasificación técnica

Clasificación natural Clasificación Taxonómica

Localidad Naranjilla-Nueva Cajamarca Precipitación Temperatura

Material madre Vegetación o cultivo cafe, caña de la

Fisiografía Terraza Aluvial India Permeabilidad Moderada

Relieve Ondulado Drenaje Moderadamente bien drenado

Altitud Escorrentía superficial Lenta

Pendiente llano Napa freática Profunda

Erosión Moderada Humedad Mojada

Distribución de raíces Profunda Porosidad

Salinidad Alcalinidad

Pedregosidad superficial exento de gravas

b) Descripción del perfil

Hor.	Prof. (cm)	Color		Text.	Modif. text.	Estruc.	Consisten.			pH	CO ₂	Limite
		Sec.	Hum.				S	<input checked="" type="checkbox"/> H	M			
P ₁	0-20	10YR	4/3	Fino Arc		GR	Friable	8.35	1.1	Difuso		
P ₂	20-40	2.5YR	4/2	Fino Arc		ABK	Friable	8.2	1.0	Abrupto		
P ₃	40-60	10R	B/3	Fino Arc gravas		SBK	Firme	8.0	-	Difuso		

Observaciones:

clase textural franco arcillosa, los dos primeros
perfiles de color Rojo Claro y el P₂ Rojo Sucia.

Fecha:

Fotografía:

DESCRIPCIÓN MOFOLOGICA DEL PERFIL DEL SUELO

a) Características generales

N° Calicata 05 Serie
 Asociación Clasificación técnica F
 Clasificación natural Clasificación Taxonómica
 Localidad Caserio la Esperanza - N.C Precipitación Temperatura
 Material madre Vegetación o cultivo Cacao, Papaya blanca,
 Fisiografía Terraza Alta Anón, mandarina, Papa natural.
 Relieve Ondulado Permeabilidad Muy lenta
 Altitud Pendiente Moderadamente inclinado Drenaje Muy Pobremente drenado
 Erosión Severa Escorrentía superficial Muy lenta
 Distribución de raíces Muy superficial Napa freática Superficial
 Salinidad Humedad mejada no saturada
 Pedregosidad superficial exento d. gravas Porosidad deficiente
 Alcalinidad

b) Descripción del perfil

Hor.	Prof. (cm)	Color		Text.	Modif. text.	Estruc.	Consisten.			pH	CO ₂	Limite
		Sec.	Hum.				S	H	M			
P1	0-20	2.5YR3/2	Arcilla	-	BA	Frías	5.74				Difuso	
P2	20-40	5YR6/2	Fino Arc	-	SBK	Firme	6.09				Abrupto.	
P3	40-60	-	-	-	-	-					-	

Observaciones:

Color del suelo superficial rojo muy oscuro
 P2 coloración del suelo pasado grisáceo.

Fecha:

Fotografía:

Apéndice 5. Resultados del Análisis de Caracterización de los Suelos



PERÚ
San Martín
Inklusiva y Solidaria
GOBIERNO REGIONAL

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS - ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE NUEVA CAJAMARCA
Av. Cajamarca Norte N° 1151, Los Olivos IV Etapa - Distrito de Nueva Cajamarca
Provincia de Rioja, San Martín. Teléfono 556443



Peam
PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO
Dirección de Desarrollo Agropecuario

RESULTADO DE ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACIÓN

NOMBRE : TESIS SYCHELLES BUENO BENANCIO

PROCEDENCIA : Nueva Cajamarca

FECHA DE INGRESO : 01-jul-15

PROFUNDIDAD : 0 - 60 cm

FECHA DE REPORTE : 20-jul-15

CULTIVO : Forestal, agrícola.

ATENCIÓN : Sychelless Bueno Benancio

Nro	CLAVE LABORATORIO	CLAVE CALIPO	PROFUNDIDAD	Textura			Clase Textural	Densidad aparente	pH	C.E. / 1:1	C.F.O. / 1:1	M.O. / 1:1	Elementos Disponibles				Elementos Cambiables					
				Arena		Limo							N	P	K	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺		
				%	%	%							%	%	ppm	ppm	ppm	meq / 100 gr de suelo				
1	ASCLIS-348	C1 P1	0 a 20 cm	23.96	21.16	54.88	Franco Limoso	1.37	7.20	0.006	-	1.385	2.387	0.0924	31.9	46.25	10.78	8.70	1.30	0.66	0.12	Trazas
2	ASCLIS-349	C1 P2	20 a 40 cm	27.96	25.12	46.92	Franco	1.35	7.10	0.002	-	1.170	2.017	0.0588	16.1	25.00	10.26	8.35	1.25	0.80	0.06	Trazas
3	ASCLIS-350	C1 P3	40 a 60 cm	25.92	25.16	48.92	Franco	1.35	7.23	0.003	-	0.449	0.773	0.0476	21.5	20.00	8.29	6.81	0.99	0.64	0.05	Trazas
4	ASCLIS-351	C2 P1	0 a 20 cm	46.40	10.16	43.44	Franco	1.52	5.93	0.003	-	1.872	3.227	0.0812	21.0	48.75	5.60	4.18	0.62	0.87	0.13	Trazas
5	ASCLIS-352	C2 P2	20 a 40 cm	46.48	14.20	39.32	Franco	1.47	5.82	0.002	-	0.702	1.210	0.0728	29.6	36.25	2.74	1.74	0.26	0.85	0.09	Trazas
6	ASCLIS-353	C3 P1	0 a 20 cm	38.44	16.20	55.36	Franco Limoso	1.42	8.12	0.004	1.0	1.112	1.916	0.0756	24.1	45.00	10.52	8.50	1.20	0.70	0.12	Trazas
7	ASCLIS-354	C3 P2	20 a 40 cm	38.40	16.24	45.36	Franco	1.43	7.96	0.005	-	1.404	2.420	0.0868	28.0	47.50	9.58	7.66	1.14	0.66	0.12	Trazas
8	ASCLIS-355	C4 P1	0 a 20 cm	34.44	6.24	59.32	Franco Limoso	1.57	8.35	0.003	1.1	0.449	0.773	0.0476	15.8	57.500	7.24	5.57	0.83	0.69	0.15	Trazas
9	ASCLIS-356	C4 P2	20 a 40 cm	37.76	20.40	41.84	Franco	1.40	8.29	0.004	1.0	0.819	1.412	0.0672	14.8	46.25	9.63	7.66	1.14	0.71	0.12	Trazas
10	ASCLIS-357	C4 P3	40 a 60 cm	37.80	24.44	37.76	Franco	1.37	8.05	0.004	-	1.287	2.219	0.0700	25.8	50.00	12.42	10.09	1.51	0.69	0.13	Trazas
11	ASCLIS-358	C5 P1	0 a 20 cm	25.76	30.40	43.84	Franco Arcilloso	1.32	5.74	0.002	-	1.248	2.152	0.0644	18.1	37.50	4.42	3.13	0.47	0.72	0.10	Trazas
12	ASCLIS-359	C5 P2	20 a 40 cm	31.72	30.48	37.80	Franco Arcilloso	1.33	6.09	0.001	-	0.195	0.336	0.0168	2.5	22.50	2.27	1.39	0.21	0.61	0.06	Trazas

METODOLOGIA EMPLEADA EN LOS ANALISIS:

Textura : Hidrómetro de Bouyoucos

pH : Potenciómetro en suspensión suelo-agua

Conductividad Eléctrica : Extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1

Carbonatos : Gasovolumétrico con calímetro de Bernard

Materia Orgánica : Walkley y Black

Nitrógeno : Micro Kjeldahl

Fósforo : Olsen Modificado

Capacidad de intercambio Catiónico : Suma de Bases cambiables

Carbono Fácilmente Oxidable (C.F.O.) = M.O. Oxidable / 1.724

Sodio y Potasio : Fotometría de Llama

Calcio y Magnesio : Versenato E.D.T.A

Aluminio cambiabile : Yuan, extracción con KCl IN

Acidez Activa : Yuan, extracción con KCl IN



Ing. Carlos Espativil de la Cruz
C.I.P. N° 32743



Ing. Florencia Flores
Laboratorista de Suelos

Apéndice 6. Cálculo del CO₂ capturado en los suelos en estudio

- Se calcula la biomasa multiplicando el volumen en m³ de cada individuo por el valor de la densidad de madera.
- Se determina el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles (materia seca por unidad de superficie contenida en el tronco de los árboles), multiplicado por la biomasa encontrada por el factor de contenido de carbono (0,45).

Ejemplo

a) Área basal:

$$A_0 = 3,1416 \times (D^2) = 3,1416 \times 0,50^2$$

b) D = 0,70 m

c) H = 12 m

d) $AB = (3,1415/4) (r^2) = (0,78604) (0,25 \text{ m}^2) = 0,196512 \text{ m}^2$

e) $V = (0,196512 \text{ m}^2) (12 \text{ m}) (0,5) = 1,17906 \text{ m}^3$

f) Biomasa = V x Densidad de la madera = $(1,17906 \text{ m}^3) (0,53 \text{ t/m}^3) = 0,6249$ toneladas/árbol

g) Contenido de carbono almacenado en la biomasa:

$$\text{Biomasa} \times 0,45 = (0,6249) (0,45) = 0,281 \text{ t de C.}$$

h) Cantidad de CO₂ capturado por la biomasa de un árbol:

$$\text{CO}_2 = \text{C} \times 3,67 = (0,281 \text{ t}) (3,67) = 1,03127 \text{ t de CO}_2 \text{ capturado}$$

Apéndice 7. Fotografías de las Fases de Campo y de Laboratorio



Imagen 01: Calicata 01



Imagen 02: Calicata 02



Imagen 03: Calicata 03



Imagen 04: Calicata 04



Imagen 05: Calicata 05



Imagen 07: Observación de los perfiles

Imagen 06: Medición de la pendiente



Imagen 08: Muestras en el laboratorio.



Imagen 08: Muestras en el laboratorio.



Imagen10: Lectura de materia orgánica.